Е.П.Левитан

Астрофизика — школьникам



Е. П. Левитан

Астрофизика — школьникам

Пособие для учащихся

МОСКВА «ПРОСВЕЩЕНИЕ», 1977

524
Л36

ОГЛАВЛЕНИЕ

Левитан Е. П.

Л36 Астрофизика — школьникам. Пособие для учащихся. М., «Просвещение», 1977.

112 с. с ил.

В интересной и доступной для учащихся форме автор рассказывает о современных проблемах астрофизики. В пособии затрагивается чрезвычайно широкий круг астрономических явлений и объектов: Солнце, звезды, галактики, квазары, планеты. Основное внимание уделено Солнцу и звездам, на примере изучения которых наглядно раскрыты возможности астрофизических исследований.

Л $\frac{60601-629}{103(03)-77}$ 226—77 524

ЮНОМУ ЛЮБИТЕЛЮ АСТРОНОМИИ

Тайны Вселенной всегда привлекали к себе внимание молодежи. Но наше время особенное — ведь нам выпало счастье быть современниками первых лет космической эры. Невозможно не интересоваться астрономией в стране, прославившейся многими достижениями в освоении космоса. Невозможно оставаться равнодушным, когда весь мир с волнением следит за полетом космонавтов или ждет вестей от автоматических устройств, доставленных на Луну и другие планеты.

Успехи космонавтики важны для многих отраслей народного хозяйства, науки и техники. Эти успехи не только порождены невиданным ранее научно-техническим прогрессом, но и служат ему. Благодаря космонавтике «вторую молодость» переживает древнейшая из наук — наука о Вселенной.

Один из ведущих разделов современной астрономии — астрофизика. Изучая природу небесных тел и процессов в космосе, человек узнает о новых источниках энергии, об удивительных свойствах вещества при сверхвысоких и сверхнизких температурах, давлениях, плотностях. В «космической лаборатории» можно наблюдать проявление гигантских сил тяготения, исследовать вещество в условиях неосуществимых на Земле гравитационных и магнитных полей. Вместе с тем изучение мира звезд и галактик обогащает нас новыми знаниями о строении Вселенной, а это имеет важное значение для формирования научного мировоззрения.

Цель данной книги — помочь вам, учащимся старших классов, интересующимся астрономией, углубить изучаемые в средней школе основы астрономии. Перед вами не учебник, а книга для чтения. Она написана не по учебной программе, но с учетом ее основных идей.

Эта книга познакомит вас с основами фундаментальных теорий и принципов астрофизики, с эволюционными идеями, которые, по словам выдающегося советского астрофизика В. А. Амбарцумяна, буквально пронизывают современную астрофизику. Вы узнаете о методах наблюдений и теоретических исследований, например, получите представление о методе «моделей». И конечно, в книге не забыты те замечательные и неожиданные открытия, которые находятся на переднем крае астрофизики 70-х годов XX в., о которых вы наверняка кое-что слышали и желаете узнать больше...

Читать придется внимательно, так как в книге почти не повторяется то, о чем можно узнать из школьного учебника, и, кроме того, по ходу чтения вам придется выполнить немало упражнений. Не пропускайте эти вопросы и задачи: они включены в текст не случайно, ибо «пока нет вопроса, нет работы мысли». Очень возможно, что для ответа на вопросы вам

придется заглянуть в учебники по астрономии и физике. Еще лучше, если, не ограничиваясь чтением и решением задач, вы, пользуясь рекомендуемой литературой, сами начнете выполнять астрономические наблюдения. Все вместе взятое поможет вам углубить свои знания по астрономии и физике, а главное — будет способствовать дальнейшему развитию у вас интереса к науке, интереса к изучению природы. Ради этого и написана книга.

Автор глубоко признателен доценту МГУ А. В. Засову и учительнице физики и астрономии школы № 397 Москвы Т. А. Таскиной за помощь в работе над рукописью этой книги.

Автор

ЛИТЕРАТУРА

I. Учебная, справочная, пособия и руководства для наблюдений

Воронцов-Вельяминов Б. А. Астрономия. Учебник для 10 класса средней школы. Изд. 10-е. М., «Просвещение», 1976.

Бакулин П. И., Кононович Э. В., Мороз В. И. Курс общей астрономии. Изд. 3-е. М., «Наука», 1974.

Дагаев М. М. Наблюдения звездного неба. Изд. 2-е. М., «Наука», 1973.

Куликовский П. Г. Справочник любителя астрономии. Изд. 4-е. М., «Наука», 1971.

Зигель Ф. Ю. Сокровища звездного неба. Изд. 3-е. М., «Наука», 1976.

Цесевич В. П. Что и как наблюдать на небе. Изд. 5-е. М., «Наука», 1973.

Школьный астрономический календарь (ежегодник). М., «Просвещение».

II. Научно-популярные книги, брошюры, статьи

Воронцов-Вельяминов Б. А. Очерки о Вселенной. Изд. 6-е. М., «Наука», 1969.

Гинзбург В. Л. Современная астрофизика. М., «Наука», 1970.

Гурштейн А. А. Извечные тайны неба. М., «Просвещение», 1973.

Зельдович Я. Б., Новиков И. Д., Старобинский А. А. Черные и белые дыры.— «Природа», 1976, № 1.

Зигель Ф. Ю. Лунные горизонты. М., «Просвещение», 1976.

Ефремов Ю. Н. В глубины Вселенной. М., «Наука», 1972.

Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли, Луны и планет. М., «Знание», 1973.

Каплан С. А. Физика звезд. Изд. 2-е. М., «Наука», 1970.

Ксанфомалити Л. В. Меркурий — брат Луны.— «Земля и Вселенная», 1976, № 1.

Левитан Е. П. Физика Вселенной. М., «Наука», 1976.

Маров М. Я. Венера: что о ней известно сегодня.—«Земля и Вселенная», 1976, № 3.

Маров М. Я. Новое о Марсе и Юпитере.— «Земля и Вселенная», 1977, № 2.

Шкловский И. С. Вселенная, жизнь, разум. Изд. 3-е. М., «Наука», 1973.

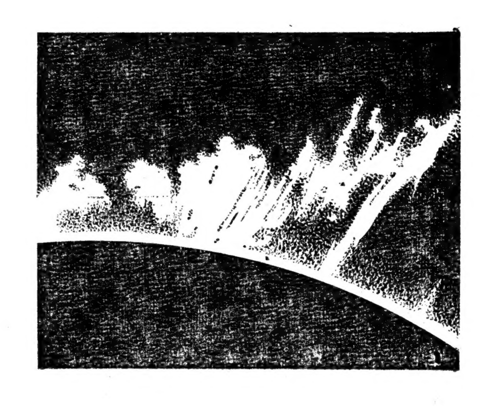
III. Научно-популярная периодическая литература

«Земля и Вселенная» — научно-популярный журнал АН СССР, пропагандирующий достижения астрономии, космонавтики и геофизики.

«Наука и жизнь» — научно-популярный журнал, в котором, кроме больших проблемных статей, интересующимся астрономией адресован постоянный раздел «Любителям астрономии».

«Космонавтика, астрономия» — серия брошюр, выпускаемых Всесоюзным обществом «Знание». Брошюры выходят ежемесячно.

СОЛНЦЕ — НАША ЗВЕЗДА



Когда бы смертным толь высоко
Возможно было возлететь,
Чтоб к Солнцу бренно наше око
Могло, приблизившись, воззреть,
Тогда б со всех открылся стран
Горящий вечно Океан.
Там огненны валы стремятся
И не находят берегов;
Там вихри пламенны крутятся,
Борющись множество веков;
Там камни, как вода, кипят,
Горящи там дожди шумят.

М. В. Ломоносов

Солнце — центральное тело Солнечной системы — играет исключительную роль в жизни Земли. Несколько миллиардов лет назад вокруг него сформировались планеты и в их числе Земля. Впоследствии весь органический мир нашей планеты стал обязан Солнцу своим существованием. Солнце не только источник света и тепла, но и первоначальный источник многих других видов энергии (энергии нефти, угля, воды, ветра). С ним не связаны лишь сейсмические процессы на Земле, небольшой приток тепла из недр Земли, энергия, выделяющаяся в результате лунных приливов и при падении метеоритов, а также ничтожное количество энергии, поступающей на Землю от других небесных тел.

НЕМНОГО ИСТОРИИ

Солнце — самое знакомое каждому небесное тело. Некоторые из вас даже думают, что они уже давно о Солнце знают все. Это, конечно, совсем не так! Солнце всегда привлекало к себе внимание людей, но и сегодня ученым приходится признавать, что Солнце таит в себе немало загадок...

Издавна у разных народов Солнце было предметом поклонения. Используя очевидную роль Солнца как источника жизни на Земле, представители церкви способствовали развитию поклонения Солнцу, культу Солнца. Солнце обожествлялось различными народами (Гелиос — греческий бог Солнца, Митра — бог Солнца у персов, Ра — у египтян, Яр или Ярило — у наших предков славян, Молох — у древних карфагенян и др.). Чтобы задобрить могущественного бога Солнца, люди приносили ему в жертву богатые дары, а нередко и человеческие жизни.

Современному представлению о Солнце предшествовал трудный многовековой путь человека от незнания к знанию, от явления к сущности, от обожествления Солнца к практическому использованию его энергии. Было время, когда люди ничего не знали о размерах Солнца и его температуре, состоянии вещества Солнца и т. д. Не зная о расстоянии до Солнца, древние принимали видимые размеры за действительные. Гераклит, например, полагал, что «Солнце имеет ширину в ступню человеческую», Анаксагор весьма неуверенно допускал, что Солнце может быть бо́льшим, чем оно кажется, и сравнивал его... с Пелопоннесским полуостровом. Совершенно неясной оставалась картина физической природы Солнца. Пифагорейцы, например, его относили к планетам и наделяли хрустальной сферой. Один из учеников Пифагора — Филолай (V в. до н. э.), допускавший мысль о движении Земли, считал, что Солнце не имеет никакого отношения к «центральному огню», вокруг которого оно, по его мнению, само вращается вместе с Землей, Луной и пятью планетами (и вымышленным небесным телом — «противоземлей») и который остается невидимым для жителей Земли. Следует отметить, что подобные выдуманные представления о движении Земли нельзя смешивать с первыми научными догадками о движении Земли, принадлежащими, по-видимому, Аристарху Самосскому (III в. до н. э.), который впервые дал метод определения сравнительных расстояний до Солнца и Луны. Несмотря на неудовлетворительность полученных результатов (было найдено, что Солнце находится в 19—20 раз дальше от Земли, чем Луна), мировоззренческое и научное значение их очень велико, так как впервые был научно поставлен и отчасти решен вопрос об определении расстояния до Солнца. Без принципиально правильного разрешения этого вопроса не могло быть и речи о выяснении истинных размеров Солнца. Во II в. до н. э. Гиппарх находит, что параллакс Солнца (т. е. угол, под которым с расстояния Солнца виден радиус Земли) равен 3′, что соответствует расстоянию до него в 1200 земных радиусов, и это считалось верным почти восемнадцать веков — до работ Кеплера, Гевелия, Галлея, Гюйгенса. Последнему (XVII в.) принадлежит наиболее точное определение расстояния до Солнца (160 млн. км). В дальнейшем исследователи отказываются от непосредственного определения параллакса Солнца и применяют косвенные методы. Так, например, довольно точное значение горизонтального параллакса получали из наблюдений Марса в противостоянии или Венеры во время ее прохождения по диску Солнца.

В XX в. успешные измерения солнечного параллакса выполнялись при наблюдениях астероидов. Была достигнута значительная точность в определении параллакса Солнца ($p_{\odot} = 8'',790 \pm 0'',001$). Солнечный параллакс измеряли и разнообразными другими методами, из которых наиболее точными оказались радиолокационные наблюдения Меркурия и Венеры,

выполненные советскими и американскими учеными в начале 60-х годов.

В настоящее время принято считать, что $p_{\odot}=8'',794$. Ему соответствует расстояние до Солнца (D), вычисленное по известной вам формуле

$$D=\frac{206\,265}{p''_{\odot}}R_{\oplus}, \qquad (1)$$

где $R_{\oplus}$ — экваториальный радиус Земли; $D=149{,}6\cdot10^6$ км (современное значение астрономической единицы расстояний). Знать с большой точностью величину астрономической единицы важно не только для определения размеров Солнца. Астрономическая единица — основная масштабная единица расстояний в Солнечной системе, она имеет фундаментальное значение для астрономии и космонавтики. Сегодня мы знаем ее величину с очень большой точностью. Достоверность наших знаний подтверждается тем, что результаты получены многими различными и независимыми методами.

К началу XVII в. относятся знаменитые телескопические наблюдения Галилеем солнечных пятен, его борьба за доказательство того, что пятна находятся на поверхности Солнца. Было открыто вращение Солнца, накоплены данные о ядрах и полутени пятен, обнаружены пятнообразовательные зоны на Солнце. Тем не менее пятна еще долгое время принимали за вершины гор или продукты вулканических извержений. Более полувека признавалась фантастическая теория Вильяма Гершеля, предложенная им в 1795 г., которая основывалась на подтвердившихся впоследствии представлениях А. Вилсона о том, что пятна — это углубления в солнечной поверхности. Согласно теории Гершеля, внутреннее ядро Солнца — холодное, твердое, темное тело, окруженное двумя слоями: внешний облачный слой — это фотосфера, а внутренний — играет роль защитного экрана (защищающего ядро от действия огнедышащей фотосферы). Тень пятна — это просвет холодного ядра Солнца сквозь облачные слои, а полутень — просветы внутреннего облачного слоя. Гершель сделал следующий общий вывод из своей теории: «С этой новой точки зрения Солнце представляется мне необычно величественной, огромной и яркой планетой; очевидно, это первое или, точнее говоря, единственное первичное тело нашей системы... всего вероятнее, что оно обитаемо, подобно остальным планетам, существами, органы которых приноровлены к особенным условиям, господствующим на этом громадном шаре». Как не похожи эти наивные представления о Солнце на гениальные мысли Ломоносова о природе нашего дневного светила!

Давно ушло в прошлое религиозное поклонение светилу. Сейчас ученые изучают природу Солнца, выясняют его влияние на Землю, работают над проблемой практического применения

неиссякаемой солнечной энергии. Важно и то, что Солнце — ближайшая к нам звезда, единственная звезда в Солнечной системе. Поэтому, изучая Солнце, мы узнаем о многих явлениях и процессах, присущих звездам и недоступных детальному наблюдению из-за огромной удаленности звезд.

СОЛНЦЕ КАК НЕБЕСНОЕ ТЕЛО

Размеры Солнца

Фигура Солнца практически не отличается от шара, хотя Солнце вращается вокруг своей оси.

Радиус Солнца можно вычислить по известной вам формуле:

$$R_{\odot}=\frac{\rho_{\odot}}{p_{\odot}} R_{\oplus}, \quad (2)$$

где $\rho_{\odot}$ и $p_{\odot}$ — соответственно угловой радиус ($\approx 16'$) и горизонтальный параллакс Солнца, а $R_{\oplus}$ — радиус Земли. Из (2) следует, что радиус Солнца примерно в 109 раз больше радиуса Земли.

Вычислите радиус Солнца в километрах.
Каков объем Солнца?

Масса Солнца

Это важнейшая характеристика любого небесного тела. В основе определения масс лежит третий закон Кеплера, обобщенный Ньютоном. Из него следует, что

$$\frac{M_{\odot}}{m}=\left(\frac{P_1}{P}\right)^2\cdot\left(\frac{a}{a_1}\right)^3, \quad (3)$$

где $M_{\odot}$ — масса Солнца; m, P и a — соответственно масса, период обращения и среднее расстояние от Солнца планеты, имеющей спутника; P_1 и a_1 — соответственно период и среднее расстояние спутника от планеты. Из этой формулы легко вычислить отношение массы Солнца к массе планеты.

Деймос отстоит от Марса на расстоянии 23 500 км и совершает один оборот вокруг Марса за $30^ч18^м$. Зная среднее расстояние Земли от Солнца и сидерический период Земли, вычислите отношение массы Марса к массе Солнца.

Составьте и решите аналогичную задачу, позволяющую определить отношение массы Земли к массе Солнца.

Вычислить массу Солнца можно, конечно, и другим способом. Вы знаете, что ускорение свободного падения на поверхности любого небесного тела можно определить по формуле:

$$g=\frac{\gamma M}{R^2}, \quad (4)$$

где γ — постоянная тяготения, а M и R — масса и радиус небесного тела. Эта формула следует из закона всемирного тяготения

и второго закона динамики. Значит, ускорение, которое создает Солнце на расстоянии, равном удалению Земли от Солнца, будет:

$$g_1 = \frac{\gamma M_\odot}{a^2}, \qquad (4')$$

где a — среднее расстояние Земли от Солнца.

Мы знаем, что Земля движется вокруг Солнца по эллипсу (1-й закон Кеплера). Но эксцентриситет эллипса мал, и в нашей задаче можно рассматривать круговое движение Земли по орбите вокруг Солнца. Тогда (4′) дает значение центростремительного ускорения, т. е.

$$\frac{\gamma M_\odot}{a^2} = \frac{v^2}{a}, \qquad (5)$$

где v — орбитальная скорость Земли. Так как $v = \frac{2\pi a}{P}$,

где P — период обращения Земли, то

$$\frac{\gamma M_\odot}{a^2} = \frac{4\pi^2 a^2}{aP^2},$$

откуда

$$M_\odot = \frac{4\pi^2 a^3}{\gamma P^2}. \qquad (6)$$

Подставив в (6) значения γ, a и P, вы найдете, что $M_\odot \approx 2 \cdot 10^{33}$ г. Так как $M_\oplus = 6 \cdot 10^{27}$ г, то масса Солнца примерно в 332 000 раз больше, чем масса Земли. Помните, у Ломоносова:

Кто видел простака из поваров такого,
Который бы вертел очаг вокруг жаркого?

Определите среднюю плотность Солнца и сравните ее со средней плотностью Земли.

Вычислите ускорение силы тяжести на поверхности Солнца, а также первую и вторую космические скорости для Солнца.

Примечание. Выполняя расчеты, вы, наверное, уже обратили внимание на то, что в астрономии и астрофизике, как правило, не удается оставаться в рамках той или иной системы единиц, например, принятой в физике (СИ). Приведем ряд примеров. Так, расстояния измеряют не только в сантиметрах (м, км), но и в астрономических единицах, световых годах, парсеках, килопарсеках и мегапарсеках. А иногда расчеты будут упрощаться, если в качестве единицы длины использовать радиус Земли или радиус Солнца. Массы небесных тел выражают не только в граммах (кг, т); предпочитают в качестве «единиц» брать массу Земли или массу Солнца. Энергию в астрофизике обычно выражают в эргах (1 эрг$=10^{-7}$ Дж), а магнитные поля характеризуют напряженностью в эрстедах $\left(1\ \text{э} = \frac{1000}{4\pi}\frac{\text{А}}{\text{м}} \approx 80\ \frac{\text{А}}{\text{м}}\right)$.

Вращение Солнца

Если сравнить несколько последовательных фотографий Солнца, то можно заметить, как меняется положение деталей, например пятен на диске (рис. 1). Это происходит из-за вращения Солнца. Солнце вращается не как твердое тело. Пятна, находящиеся вблизи экватора Солнца, опережают пятна, расположенные в средних широтах. Следовательно, скорости вращения разных слоев Солнца различны: точки экваториальной области



Рис. 1. Наблюдая солнечные пятна, легко обнаружить вращение Солнца.

Солнца имеют не только наибольшие линейные, но и наибольшие угловые скорости. (С подобной особенностью вращения мы встречаемся и у планет-гигантов.) Период вращения экваториальных областей Солнца 25 земных суток, а полярных — более 30.

Химический состав и температура Солнца

Эти важнейшие сведения о физике Солнца получены из анализа его спектра. Напомним, что спектр Солнца — это непрерывный спектр с множеством линий поглощения. Линии поглощения — фраунгоферовы линии — возникают вследствие того, что излучение, идущее от фотосферы, проходит через расположенные над ней слои газа. Атомы лежащих над фотосферой более холодных слоев солнечной атмосферы переизлучают и рассеивают поглощенное ими излучение фотосферы по самым различным направлениям. В результате фраунгоферовы линии, положение которых точно соответствует линиям излучения разреженного газа, оказываются более темными, чем участки непрерывного спектра, на фоне которого они наблюдаются. Атомы, расположенные над фотосферой, поглощают из ее непрерывного излучения лишь те кванты, которые сами могут излучать. Исследование фраунгоферовых линий позволяет определить химический состав атмосферы Солнца. На Солнце обнаружено более 70 химических элементов. Никаких «неземных» элементов Солнце не содержит. Самые распространенные элементы на Солнце — водород (около 70% всей массы Солнца) и гелий (29%).

Чтобы выяснить, в каком состоянии находится вещество на Солнце, необходимо знать температуру Солнца. Существуют различные способы ее определения. Один из них основан на исследовании распределения энергии в непрерывном спектре Солнца. Наблюдения показывают, что количество энергии, излучаемой Солнцем в разных участках спектра, неодинаково. Больше всего Солнце излучает энергии в желто-зеленой части спектра, близкой к длине волны 5000 Å. Известно не только распределение энергии в видимой части спектра, но и в ультрафиолетовой и инфракрасной областях. Новые сведения были получены

с помощью спектрографов, установленных на искусственных спутниках Земли и космических ракетах.

Исследуя распределение энергии в спектре Солнца, определили температуру фотосферы: она близка к 6000 К. При такой температуре любое вещество находится на Солнце лишь в газообразном состоянии, а атомы некоторых химических элементов (Na, K, Ca) ионизуются. 6000 К — это та температура, при которой установилось и длительное время поддерживается равновесие между энергией, вырабатываемой внутри Солнца, и энергией, излучаемой Солнцем в космическое пространство. С глубиной температура возрастает, а вместе с тем увеличивается число ионизованных атомов.

Теперь можно несколько дополнить то, что выше было сказано о причинах появления в спектре Солнца фраунгоферовых линий. Оказывается, наибольшую роль в формировании спектра фотосферы Солнца и подобных ему звезд играет поглощение отрицательными ионами водорода (H^- — это атом водорода с присоединившимся к нему электроном). Как могли образоваться в фотосфере отрицательные ионы водорода? Откуда взялись свободные электроны, которые нужны для присоединения к атомам нейтрального водорода? Чтобы ответить на эти вопросы, нужно вспомнить о том, что, кроме водорода, в фотосфере есть и другие химические элементы. Например, металлы, атомов которых в десятки тысяч раз меньше, чем атомов водорода. Однако при ионизации металлов (а условия для этого в фотосфере вполне подходящие) возникают свободные электроны, которые необходимы для появления H^-. Даже небольшое количество отрицательных ионов водорода сказывается на оптических свойствах фотосферы: она из-за поглощательной деятельности H^- становится непрозрачной для видимого излучения. Поэтому, во-первых, нижний слой солнечной атмосферы (фотосфера) простирается не более чем на 400 км и воспринимается земным наблюдателем, удаленным от Солнца на 150 млн. км, как «поверхность» Солнца. Во-вторых, к краю диск Солнца заметно темнее: на краю диска мы воспринимаем излучение лишь от внешних и относительно холодных подфотосферных слоев, а в центре диска луч зрения проникает глубже и достигает более горячих слоев.

Светимость Солнца

Определим мощность солнечного излучения — количество энергии, ежесекундно излучаемое Солнцем. Для этого вспомним, что мы знаем о «солнечной постоянной», т. е. о количестве энергии, которое падает за 1 мин на площадку в 1 см², расположенную перпендикулярно солнечным лучам вне земной атмосферы при среднем расстоянии Земли от Солнца. Для измерения солнечной постоянной на высокогорных станциях подсчитывают количество тепла, которое получает налитая в специальные

сосуды вода от зачерненного и нагреваемого солнечными лучами металлического диска. В результате тщательных измерений, выполненных с учетом поглощения солнечных лучей в земной атмосфере видимого, инфракрасного и ультрафиолетового излучений, нашли, что солнечная постоянная равна

$$2 \text{ кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин}) = 1{,}4 \cdot 10^6 \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}) \approx 0{,}14 \text{ вт}/\text{см}^2.$$

Очевидно, что если умножить эту величину на поверхность сферы радиусом 1 а. е. ($4\,\pi a^2$), то мы как раз и получим светимость Солнца. Проделав эти вычисления, убедитесь, что

$$L_{\odot} = 3{,}9 \cdot 10^{33} \text{ эрг/с}.$$

Итак:

$R_{\odot} = 700\,000$ км $= 7 \cdot 10^{10}$ см,
$M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33}$ г,
$\bar{\rho}_{\odot} = 1{,}41$ г/см³,
$g_{\odot} = 274$ м/с²,
$T = 6000$ К,
$L_{\odot} = 3{,}9 \cdot 10^{33}$ эрг/с.

СОЛНЦЕ — ПЛАЗМЕННЫЙ ШАР

Мы уже знаем, что в условиях господствующих на Солнце температур вещество в недрах нашего светила и в верхних слоях его атмосферы очень сильно ионизовано. Смесь ионов и электронов — плазма — самая распространенная форма существования вещества во Вселенной. Солнце, как и все другие звезды, представляет собой плазменный шар.

Можно сказать, что плазма находится в «двойном подчинении». Будучи газом, она обязана следовать газовым законам и законам термодинамики. Будучи смесью электрически заряженных частиц, она вынуждена следовать предписаниям электродинамики и магнитогидродинамики (магнитной гидродинамики). В плазме легко возникают электрические токи и магнитные поля, она взаимодействует с электрическими и магнитными полями, в которых находится и которые возникают в ней самой. Все эти поля определяют характер движения и поведения плазмы, нередко вызывая эффекты, не свойственные движению нейтрального газа.

К своенравным свойствам «земной» плазмы (среди которых особое место занимают подвижность, неустойчивость, приверженность к самым разным типам волновых движений и т. д.) добавляются особенности, присущие «космической» плазме. Гигантские масштабы космической лаборатории, как правило, не ограничивают плазму «стенками», которые неизбежно «стесняют» плазму в земных лабораториях, увеличивая ее неоднородность и неустойчивость. На Солнце, как и вообще в космосе, астрофизики встречаются и со спокойной и с весьма турбулентной плазмой, рассматривая ее взаимодействие с излучением и магнитными полями.

Каковы же особенности поведения «космической» плазмы в магнитном поле? Мы остановимся на некоторых общих пред-

ставлениях и закономерностях. Наше рассмотрение будет, конечно, очень элементарным, так как нам важно понять наиболее существенные черты, свойственные явлениям, происходящим не только на Солнце, но и в других «отделах» космической лаборатории.

Космические масштабы позволяют с известным приближением считать плазму идеальным проводником, проводимость которого неограниченно велика, и изучать модель сплошной «проводящей жидкости», где не рассматривается движение отдельных частиц. Вы знаете, что согласно закону электромагнитной индукции изменение магнитного потока через замкнутый контур порождает электродвижущую силу в контуре. Но в космосе нет металлических жестких контуров. Можно лишь мысленно выделить в проводящей плазме «силовые трубки», начиненные пучками силовых линий магнитного поля. Сечение таких трубок (или число силовых линий, содержащихся в пучке) характеризует напряженность магнитного поля. При перемещениях относительно поля плазмы контур изменяет свою форму, значит, изменяется проходящий через него магнитный поток. Это вызывает появление индукционного тока, магнитное поле которого (по правилу Ленца) противодействует исходному. В результате будет происходить движение плазмы вместе с магнитными силовыми линиями. Получается, что всякое движение среды увлекает как бы «вмороженные» в плазму силовые линии.

Магнитное поле препятствует движению вещества поперек силовых линий, но не мешает веществу двигаться вдоль них. При всяком нарушении равномерного распределения магнитных силовых линий возникает магнитное давление $\left(p_{\text{маг}}=\frac{H^2}{8\pi},\right.$ где H — напряженность поля), сила которого направлена в сторону уменьшения магнитного поля. Магнитное давление столь же «реально», как и механическое давление или давление излучения. Поэтому в астрофизических условиях и, в частности, при анализе условий на Солнце приходится постоянно сопоставлять все действующие факторы.

ЯВЛЕНИЯ, НАБЛЮДАЕМЫЕ НА СОЛНЦЕ

Явления в фотосфере

Фотосфера — «светящаяся сфера» Солнца — самый нижний слой его атмосферы толщиной в сотни километров, излучающий львиную долю поступающей от Солнца энергии. Здесь плотность газа не более $5\cdot10^{-7}$ г/см^3. Это значит, что число атомов водорода в 1 см^3 фотосферы не превышает $3\cdot10^{17}$.

Сравните это с плотностью и числом частиц, содержащихся в 1 см^3 воздуха (при комнатной температуре и нормальном давлении).

На фотографиях фотосферы отчетливо видна ее ячеистая структура — грануляция. Гранулы ярче, а значит, и горячее, чем окружающие их участки фотосферы. Постоянная турбулентность земной атмосферы очень мешает наблюдению гранул. Лучшие фотографии гранул удается получить, поднимая телескопы на стратосферных аэростатах. В нашей стране такие эксперименты успешно проводятся под руководством директора Пулковской обсерватории члена-корреспондента АН СССР В. А. Крата.

Размеры гранул неодинаковы. Самые мелкие из них не достигают 200 км. Время существования отдельных гранул около 8 мин. Непрерывно появляющиеся и исчезающие гранулы свидетельствуют о том, что вещество, из которого состоит фотосфера, находится в движении. Один из видов движений в фотосфере и подфотосферных слоях — вертикальный подъем и опускание вещества. Такое колебательное движение скорее всего связано с конвекцией, причем гранулы, по мнению большинства астрономов, представляют собой верхушки конвективных потоков, проникающих в фотосферу из нижележащих слоев. Гранулы всегда наблюдаются на всей поверхности Солнца. Другие детали фотосферы (пятна, факелы) появляются лишь время от времени.

Диаметры наибольших из зарегистрированных пятен превышают 200 тыс. км. Пятна — детали фотосферы, существующие от нескольких дней до нескольких месяцев. Иногда на Солнце не бывает пятен совсем, но иногда наблюдаются десятки крупных пятен. Многолетние наблюдения пятнообразовательной деятельности Солнца показали, что имеются циклические колебания числа пятен, причем средняя продолжительность цикла составляет примерно 11 лет.

Центральная часть пятна — ядро (или тень) окружена волокнистой полутенью. Пятна представляют собой конические воронки, глубина которых примерно 300—400 км. Вблизи края солнечного диска круглое пятно вследствие проекции видно как эллиптическое, а совсем близко от края диска видна лишь узкая полоса полутени.

Пятна кажутся темными лишь по контрасту с фотосферой. На самом деле температура ядра (самой холодной части пятна) около 4300 К, т. е. выше температуры электрической дуги, на которую, как известно, невозможно смотреть без защитных очков.

Различием температуры пятен и фотосферы объясняется различие их спектров. Яркость непрерывного спектра пятен меньше яркости непрерывного спектра фотосферы. Кроме линий поглощения, в спектре пятен обнаружены полосы поглощения, принадлежащие CN, NH, TiO и др., что также указывает на более низкую температуру пятен по сравнению с фотосферой.

Обычно пятна наблюдаются группами. Пятно в группе, которое является первым по направлению вращения Солнца, называется головным, последнее пятно в группе называется хвосто-

вым. Фраунгоферовы линии в спектре пятен сильно расщеплены, что свидетельствует о существовании магнитных полей напряженностью 2000—4000 э. Головные и хвостовые пятна имеют разную полярность: например, если у головных пятен северный магнитный полюс, то у хвостовых — южный, т. е. в целом группа пятен подобна гигантскому магниту. Замечательно, что в соседних 11-летних циклах группы пятен изменяют свою полярность. Например, если в данном цикле все головные пятна групп в северном полушарии Солнца имели северный магнитный полюс, то в следующем цикле северный магнитный полюс будет у хвостовых пятен.

Общее магнитное поле Солнца едва ли превышает 1 э.

Наблюдение за появлением и развитием групп солнечных пятен — увлекательная тема школьных астрономических наблюдений. Только помните, что наблюдать Солнце нужно очень осторожно. Нельзя смотреть на Солнце, не защитив глаза тщательно закопченным стеклом. В школьный телескоп можно рассматривать Солнце только в том случае, если у вас есть надежный светофильтр, установленный перед объективом или окуляром телескопа. Но еще лучше укрепить на окулярном конце телескопа экран с листом белой бумаги и зарисовывать изображения Солнца на экране. Такие наблюдения позволят вам заметить вращение Солнца, изучать развитие групп солнечных пятен, подсчитывать относительные числа (W) пятен по формуле

$$W=10g+f \qquad (7)$$

(где g — число групп, f — число отдельных пятен), и строить графики пятнообразовательной деятельности Солнца. Подробнее о том, как должны выполняться подобные наблюдения, прочитайте в «Справочнике любителя астрономии» П. Г. Куликовского.

Факелы — образования более светлые (а значит, и более горячие), чем фотосфера. Если группа пятен находится вблизи края солнечного диска, то вокруг нее обычно видно множество факелов — факельное поле. Факелы возникают незадолго до появления солнечных пятен и существуют в среднем в три раза дольше пятен. В местах, где наблюдаются факелы, на поверхность Солнца выносится более горячее вещество, чем в других участках фотосферы.

Явления в хромосфере

Хромосфера простирается до высоты 10—14 тыс. км. В ее самых нижних слоях температура около 5000 К, а затем по мере подъема над фотосферой она начинает постепенно расти, достигая в верхних слоях хромосферы 20—50 тыс. градусов.

Вне затмения астрономы наблюдают хромосферу, выделяя очень узкий участок спектра и получая изображение Солнца в свете какой-нибудь одной спектральной линии. Это делается, например, с помощью спектрогелиографа, принцип работы которого состоит в том, что из спектра, полученного обычным спектрографом, вырезают нужный участок (ставят вторую щель) и за ней устанавливают фотопластинку. Другой способ связан с наблюдениями Солнца через узкополосные фильтры, пропу-

скающие излучение строго фиксированной длины волны (интерференционно-поляризационные фильтры). Так как различные линии спектра возникают на разных высотах над «поверхностью» Солнца, то, переходя от линии к линии, можно исследовать разрез хромосферы Солнца. Сравните две фотографии Солнца (рис. 7 вклейки). Левая получена в обычном (белом) свете. Это изображение фотосферы с пятнами и факелами. Правая фотография снята в свете линии водорода с длиной волны 6563 Å. На ней видна хромосфера Солнца, состоящая из темных и светлых узелков, которые располагаются в виде сетки. Размеры ячеек хромосферной сетки значительно превосходят размеры гранул фотосферы, достигая 30—50 тыс. км. Яркость хромосферы неодинакова. Наиболее яркие ее участки (хромосферные факелы) расположены над фотосферными факелами и пятнами.

Одно из интереснейших явлений в хромосфере Солнца — вспышки. Сначала увеличивается яркость небольшого участка хромосферы, а затем область охватывает десятки миллиардов квадратных километров. Слабые вспышки исчезают через 5—10 мин, а самые мощные продолжаются несколько часов. Не очень большие вспышки происходят на Солнце по нескольку раз в сутки. Мощные вспышки наблюдаются значительно реже. Обычно хромосферные вспышки появляются вблизи пятен, особенно тех, которые быстро изменяются. По характеру явления (стремительность развития, огромное энерговыделение — до 10^{32}—10^{33} эрг) хромосферные вспышки представляют собой взрывные процессы. Вспышки сопровождаются мощным ультрафиолетовым, рентгеновским и радиоизлучением. В межпланетное пространство выбрасываются электрически заряженные частицы (корпускулы). Уже ряд лет исследования вспышек проводятся под руководством академика А. Б. Северного на Крымской астрофизической обсерватории АН СССР.

Сравните количество энергии, которое выделяется при вспышке, с количеством энергии, выделяющейся при взрыве мегатонной бомбы ($\approx 4 \cdot 10^{22}$ эрг).

Исключительно мощная вспышка наблюдалась на Солнце 4 августа 1972 г. Это была протонная вспышка, сопровождавшаяся появлением в окрестностях Земли потоков ускоренных ядер атомов водорода с энергиями до сотен миллионов электрон-вольт.

Явления в солнечной короне

Это наиболее разреженная часть атмосферы Солнца ($\approx 10^{-16}$ г/см^3). Внутренние области короны, удаленные от фотосферы на расстояния до одного радиуса Солнца, можно наблюдать не только во время полных солнечных затмений, но и вне затмения с помощью коронографа — специального телескопа, в фокусе объектива которого ставится зачерненный диск («искусственная Луна»). Коронографы устанавливают в горах на

высоте не ниже 2000 м над уровнем моря, где значительно меньше рассеяние света в земной атмосфере.

На краю солнечного диска видны протуберанцы — гигантские яркие выступы или арки, находящиеся в солнечной короне. Спокойные протуберанцы существуют по нескольку недель и даже месяцев. Вещество протуберанцев поглощает и рассеивает идущее снизу излучение, а потому, проецируясь на яркий диск Солнца, протуберанцы выглядят как темные волокна. В отличие от спокойных протуберанцев, активные протуберанцы характеризуются очень быстрыми движениями, выбросами вещества в корону. Наглядное представление о движении вещества в протуберанцах дает кинематографирование: протуберанцы фотографируют на кинопленку на протяжении нескольких часов через 30-секундные интервалы времени, а затем кинофильм показывают с обычной скоростью (24 кадра в секунду).

Форма короны не остается постоянной. В годы, когда на поверхности Солнца много пятен, корона почти круглая. Когда же пятен мало, корона сильно вытянута в плоскости экватора Солнца. Корона неоднородна: в ней наблюдаются лучи, дуги, отдельные сгущения вещества. Детали короны неразрывно связаны с пятнами и факелами, а также с явлениями в хромосфере. Все детали короны вращаются с той же угловой скоростью, что и расположенные под ними участки фотосферы.

Белый цвет короны — следствие рассеивания света на свободных электронах, которые способны рассеивать свет, не меняя его длины волны. Каждый свободный электрон рассеивает 10^{-24} часть излучения, падающего на площадку 1 см^2. Яркость короны в 10^6 раз меньше яркости фотосферы, а значит, в короне расположенный вдоль луча зрения столбик с сечением 1 см^2 содержит $10^{-6}:10^{-24}=10^{18}$ свободных электронов. Если рассматривать только внутреннюю корону и считать, например, что протяженность столбика равна 10^{10} см (т. е. $R_{\odot}/7$), то в 1 см^3 содержится $10^{18}:10^{10}=10^8$ свободных электронов. Примерно такова же концентрация протонов, т. е. в целом корона электронейтральна.

Сравните концентрацию частиц в фотосфере и короне.

Как далеко простирается корона? По фотографиям, полученным во время затмений, корону удается проследить на расстоянии до нескольких солнечных радиусов от края Солнца. Отдельные выбросы солнечной плазмы, которые как бы входят в состав «сверхкороны» Солнца, достигают земной орбиты. Сверхкорона была открыта радиоастрономическими методами.

Огромная протяженность короны объясняется большими скоростями входящих в нее частиц, а значит, и высокой температурой короны. Этот же вывод подтверждает и исследование спектра короны. Ряд линий в спектре короны оставался загадочным до 40-х годов. Оказалось, что эти линии принадлежат

многократно ионизованным атомам хорошо известных на Земле элементов. Например, зеленая корональная линия с длиной волны 5305 Å испускается атомами железа, лишенными 13 электронов. Такая и еще более высокая ионизация в очень разреженном веществе короны возможна при температуре не менее 1—1,5 млн. градусов. В отдельных местах короны температура может достигать $10 \cdot 10^6$ К! Значит, корона неоднородна, физические условия в наблюдаемых в ней «волокнах», «дырах» и т. д. весьма различны и сейчас интенсивно исследуются астрофизиками. Это очень важно, потому что, наблюдая корону, можно изучать в космической лаборатории высокотемпературную разреженную плазму в естественных условиях.

Солнечная активность

Совокупность различных нестационарных процессов на поверхности Солнца и в его атмосфере (пятна, факелы, протуберанцы, хромосферные вспышки и т. д.) называется солнечной активностью. Все проявления солнечной активности тесно связаны друг с другом. Так, солнечные пятна всегда связаны с фотосферными факелами, хромосферные вспышки и протуберанцы в большинстве случаев образуются над «возмущенными» местами фотосферы и т. д. Области на Солнце, где наблюдаются пятна, факелы, вспышки, протуберанцы и другие проявления солнечной активности, называются активными областями (или центрами активности). Центры активности, зарождаясь на некоторой глубине под фотосферой, простираются в виде нескольких ярусов далеко в солнечную корону. Связующее звено между различными ярусами центров активности — магнитное поле.

Не только появление пятен, но и солнечная активность в целом имеет 11-летнюю цикличность. В годы максимума солнечной активности на Солнце много центров активности («возмущенное» Солнце). В годы минимумов центров активности мало («спокойное» Солнце). Природа цикличности солнечной активности еще во многом загадочна. Но несомненно, что цикличность обусловлена усилением и ослаблением магнитных полей, зарождающихся в подфотосферных потоках движущегося ионизованного газа.

СОЛНЕЧНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ЗЕМЛЮ

Свет и тепло

Как мы знаем, количество энергии, получаемой Землей от Солнца, характеризуется «солнечной постоянной». Измерения солнечной постоянной проводились на протяжении многих лет, включая годы максимума и минимума солнечной активности. Оказалось, что величина солнечной постоянной практически не

меняется. Значит, полное количество энергии, излучаемой Солнцем в единицу времени, постоянно (несмотря на разнообразные проявления его активности).

Из общего количества энергии, излучаемой Солнцем в межпланетное пространство, границ земной атмосферы достигает лишь 1/2 000 000 000 часть. Примерно треть солнечного излучения, падающего на Землю, отражается ею и рассеивается в межпланетном пространстве. Много солнечной энергии идет на нагревание земной атмосферы, океанов и суши. Но и остающаяся доля обеспечивает существование жизни на Земле!

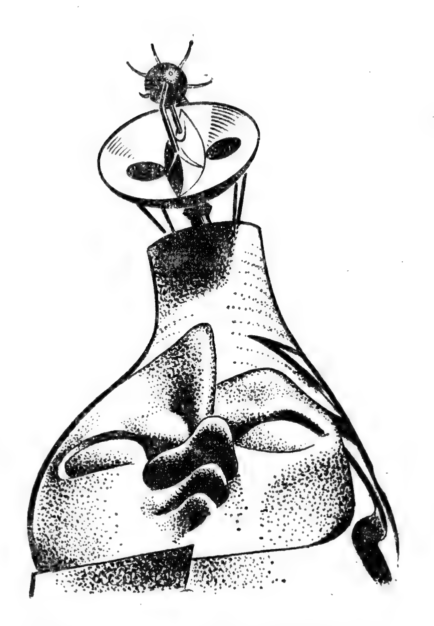


Рис. 2. 70-метровая «Башня Солнца», символизирующая зависимость жизни на Земле от Солнца (одна из эмблем Всемирной выставки в Осака. Япония, 1970 г.).

В будущем люди обязательно научатся непосредственно превращать солнечную энергию в другие виды энергии. Уже применяются в народном хозяйстве простейшие гелиотехнические установки: различные типы солнечных теплиц, парников, опреснителей, водонагревателей, сушилок. Солнечные лучи, собранные в фокусе вогнутого зеркала, плавят самые тугоплавкие металлы. Ведутся работы по созданию солнечных электростанций, по использованию солнечной энергии для отопления домов и опреснения морской воды. Практическое применение находят полупроводниковые солнечные батареи, непосредственно превращающие энергию Солнца в электрическую энергию. Наряду с химическими источниками тока солнечные батареи используются, например, на искусственных спутниках Земли и космических ракетах. Все это лишь первые успехи гелиотехники.

Коротковолновое излучение Солнца

Ультрафиолетовые и рентгеновские лучи исходят в основном от верхних слоев хромосферы и короны. Это удалось доказать, запуская ракеты с приборами во время солнечных затмений. Очень горячая солнечная атмосфера всегда является источником невидимого коротковолнового излучения, но особенно мощным оно бывает в годы максимума солнечной активности. В это время ультрафиолетовое излучение возрастает примерно в два раза, а рентгеновское — в десятки и даже сотни раз по сравнению с излучением в годы минимума. Интенсивность коротко-

волнового излучения изменяется также ото дня ко дню, резко возрастая, когда в хромосфере Солнца происходят вспышки.

Коротковолновое излучение Солнца оказывает влияние на процессы, происходящие в атмосфере Земли. Так, например, ультрафиолетовые и рентгеновские лучи частично ионизуют слои воздуха, образуя слой земной атмосферы — ионосферу. Ионосфера играет важную роль в осуществлении дальней радиосвязи: радиоволны, идущие от радиопередатчика, прежде чем достичь антенны приемника, многократно отражаются от ионосферы и от поверхности Земли. Состояние ионосферы меняется в зависимости от условий освещения ее Солнцем и от происходящих на Солнце явлений. Поэтому для обеспечения устойчивой радиосвязи приходится учитывать время суток, время года и состояние солнечной активности. Во время наиболее мощных вспышек на Солнце число ионизованных атомов в ионосфере возрастает и радиоволны частично или полностью поглощаются ею. Это приводит к ухудшению или даже к временному прекращению радиосвязи.

Радиоизлучение

Систематическое исследование радиоизлучения Солнца началось только после второй мировой войны, когда выяснилось, что Солнце — мощный источник радиоизлучения. В межпланетное пространство проникают радиоволны, которые излучает хромосфера (сантиметровые волны) и корона (дециметровые и метровые волны) — они и достигают Земли.

Радиоизлучение Солнца имеет две составляющие — постоянную, почти не меняющуюся, и переменную, спорадическую (всплески, «шумовые бури»). Радиоизлучение «спокойного» Солнца объясняется тем, что горячая солнечная плазма всегда излучает радиоволны наряду с электромагнитными колебаниями других длин волн (тепловое радиоизлучение). Во время больших хромосферных вспышек радиоизлучение Солнца возрастает в тысячи и даже миллионы раз по сравнению с радиоизлучением спокойного Солнца. Это радиоизлучение, порожденное быстропротекающими нестационарными процессами, имеет нетепловую природу.

Корпускулярное излучение

Ряд геофизических явлений (магнитные бури, т. е. кратковременные изменения магнитного поля Земли, полярные сияния и др.) вызван солнечной активностью. Но эти явления происходят не ранее чем через сутки после вспышек на Солнце. Вызываются они не электромагнитным излучением, доходящим до Земли через 8,3 мин, а изверженными корпускулами, которые с опозданием проникают в околоземное пространство.

Корпускулы испускаются Солнцем и тогда, когда на нем нет вспышек и пятен. Непрерывно расширяющаяся корона создает

солнечный ветер, охватывающий движущиеся вблизи Солнца планеты и кометы. Вспышки сопровождаются «порывами» солнечного ветра. Эксперименты на космических ракетах и искусственных спутниках Земли позволили непосредственно обнаружить солнечные корпускулы в межпланетном пространстве.

Во время вспышек в межпланетное пространство проникают не только корпускулы, но и магнитное поле — все это определяет «обстановку» в околоземном космическом пространстве. Так, например, солнечный ветер деформирует геомагнитное поле, сжимает его и локализует в пространстве; корпускулы заполняют радиационный пояс. С проникновением корпускул в земную атмосферу связаны полярные сияния. После вспышек на Солнце на Земле происходят магнитные бури. Так, после вспышки 4 августа 1972 г. произошла сильная магнитная буря, нарушившая радиосвязь на коротких волнах, наблюдались полярные сияния и резкое снижение уровня космических лучей, которые шли к нам из глубин Галактики и которым преградили путь изверженные Солнцем плазменные потоки (*эффект Форбуша*).

Проблема «Солнце — Земля»

Эта проблема, связывающая солнечную активность с ее воздействием на Землю, находится на стыке нескольких важнейших для человечества наук — астрономии, геофизики, биологии, медицины.

Некоторые части этой комплексной проблемы исследуются уже несколько десятилетий, например ионосферные проявления солнечной активности. Здесь удалось не только накопить множество фактов, но и обнаружить закономерности, имеющие большое значение для осуществления бесперебойной радиосвязи (выбор рабочих частот радиосвязи и прогнозы условий радиосвязи).

Давно известно, что колебания магнитной стрелки во время магнитной бури особенно заметны в дневное время и имеют наибольшую амплитуду, иногда достигающую нескольких градусов, в периоды максимума солнечной активности. Хорошо известно и то, что магнитные бури обычно сопровождаются свечением верхних слоев атмосферы. Это полярные сияния — одно из красивейших явлений природы. Необычайная игра красок, внезапная смена спокойного свечения стремительным перемещением дуг, полос и лучей, образующих то гигантские шатры, то величественные занавесы, издавна привлекала к себе людей. Полярные сияния, как правило, наблюдаются в полярных областях земного шара. Но иногда в годы максимумов солнечной активности их можно наблюдать и в средних широтах. В полярных сияниях преобладают два цвета: зеленый и красный. Окраска полярных сияний обусловлена излучением атомов кислорода (наиболее интенсивны в спектрах полярных сияний зеленая и красная линии).

Существует связь между явлениями на Солнце и процессами в нижних слоях земной атмосферы. Солнечное излучение воздействует на тропосферу. Выяснение механизма этого воздействия необходимо для метеорологии. Важное значение имеют работы советских ученых и особенно члена-корреспондента АН СССР Э. Р. Мустеля.

В последнее время все большее внимание ученых привлекают разнообразные явления в биосфере, которые, как показывают наблюдения, связаны с солнечной активностью. Так, биологи отмечают, что в течение 11-летнего цикла солнечной активности происходят изменения в приросте лесонасаждений, условиях существования отдельных видов животных, птиц, насекомых. Врачи заметили, что в годы максимума солнечной активности заметно обостряются некоторые сердечно-сосудистые заболевания и нервные заболевания. Это, в частности, связывается с обнаруженным влиянием геомагнитного поля на различные коллоидные системы, включая кровь человека. Изучение подобных солнечно-земных связей только начинается.

Чтобы всесторонне исследовать явления, происходящие на Солнце, проводятся систематические наблюдения Солнца («служба Солнца») на многочисленных советских и зарубежных обсерваториях. Одна из основных и пока еще не решенных задач «службы Солнца» — предсказание (прогноз) солнечных вспышек. Прогнозы вспышек позволяют своевременно предотвратить нарушения радиосвязи, а также принять меры, необходимые для обеспечения безопасного пребывания человека в открытом космосе.

Изучение воздействия Солнца на Землю требует объединения усилий ученых многих стран. В историю науки уже вошли «Международный геофизический год» — МГГ (1957—1958 гг.), проводившийся во время мощного максимума солнечной активности, и «Международный год спокойного Солнца» — МГСС (1964—1965 гг.), который был приурочен к минимуму солнечной активности. В МГСС приняло участие свыше 70 стран. Наблюдения проводились на всех континентах Земли; данные о процессах, происходящих на Солнце и Земле, были получены с помощью приборов, находящихся на искусственных спутниках Земли и космических ракетах, на горных вершинах и в глубинах океанов.

Инициатором проведения МГСС и одним из самых активных его участников был Советский Союз.

Комплексные астрономические и геофизические исследования Солнца будут продолжены. Важную роль в них играют эксперименты в космосе. Так, на борту искусственного спутника Земли «Интеркосмос-1», запущенного 14 октября 1969 г., была установлена научная аппаратура для исследования коротковолнового излучения Солнца и его влияния на земную атмосферу. Этот спутник был запущен в СССР в соответствии с про-

граммой сотрудничества социалистических стран по исследованию и использованию космического пространства в мирных целях. Исследования, начатые на «Интеркосмосе-1», были продолжены на ряде других спутников этой серии («Интеркосмос-4, -7, -11, -16»). Так, например, основной задачей экспериментов, проводившихся на «Интеркосмосе-16» (июль 1976 г.), было исследование ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца и влияние этого излучения на структуру верхней атмосферы Земли.



Рис. 3. Солнце находится в механическом равновесии.

ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ И «МОДЕЛИ» СОЛНЦА

Результаты, полученные в предыдущих параграфах, помогут нам «проникнуть» в недра Солнца и, пользуясь известными законами физики, оценить условия в недрах Солнца. Будем исходить из того, что устойчивое равновесие Солнца обеспечивается равновесием сил тяготения, стремящихся сжать газовый шар, и противодействующих им сил внутреннего газового давления (рис. 3). Сразу же оговоримся, что мы не ставим перед собой задачу вывести точные формулы, так как для этого необходимо знание физики и математики в пределах, далеко выходящих за рамки школьных программ. Приближенные оценки могут быть сделаны разными способами. Давайте познакомимся с некоторыми из них.

Давление

Газовое давление вблизи центра газового шара Солнца уравновешивается весом столба вещества высотой $h=R_\odot$ и площадью поперечного сечения $S=1$ см^2. Воспользуемся формулой закона всемирного тяготения

$$F=\gamma \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (8)$$

и подставим в нее $m_1=M_\odot$ и $m_2=m$ — массу рассматриваемого столба вещества. Допустим, что плотность вещества $\rho=\bar{\rho}_\odot$ (хотя на самом деле в недрах Солнца плотность большая, а в фотосфере ничтожно малая). Тогда

$$m=\bar{\rho}_\odot Sh=\bar{\rho}_\odot R_\odot S.$$

Далее, пренебрегая тем, что разные части столбика неодинаково притягиваются к центру Солнца, будем считать, что в

формуле (8) $r=\frac{R_\odot}{2}$, т. е. это просто расстояние между центром Солнца и серединой столбика. Тогда из (8) имеем:

$$p=\frac{F}{S}=\frac{\gamma M_\odot \bar{\rho}_\odot R_\odot S}{(R_\odot/2)^2 S}=\frac{4\gamma\bar{\rho}_\odot M_\odot}{R_\odot}. \qquad (9)$$

В силу сказанного выше эта величина должна быть численно равна газовому давлению вблизи центра Солнца, т. е.

$$p_ц=\frac{4\gamma\bar{\rho}_\odot M_\odot}{R_\odot}. \qquad (10)$$

Учитывая (10), найдем порядок величины давления в центре Солнца:

$$p_ц=10^{11}\ Н/см^2=10^{10}\ атм.$$

Более точные расчеты дают значение $p_ц \approx 10^{12}$ Н/см². Для сравнения укажем, что в последние годы в Институте физики высоких давлений АН СССР проводились эксперименты, позволившие получить рекордные давления порядка нескольких млн. атмосфер ($\approx 10^6$ атм). Таковы в настоящее время возможности «земной» лаборатории.

Плотность

Плотность в центре Солнца ($\rho_ц$) больше $\bar{\rho}_\odot$ в несколько раз, во всяком случае

$$\rho_ц \geqslant 10\bar{\rho}_\odot. \qquad (10')$$

Считается, что в центре Солнца $\rho_ц \approx 140$ г/см³.

Вспомните, что речь идет о плотности газа, и сравните эту плотность с плотностью свинца!

Температура

Несмотря на большую плотность, даже в центре Солнца расстояния между частицами вещества велики по сравнению с размерами частиц. А это позволяет применить к веществу в центре Солнца закон Менделеева — Клапейрона:

$$p=\frac{R}{\mu}\rho T, \qquad (11)$$

где p — давление газа; $R=8{,}3\cdot 10^7$ эрг/(моль·К) — универсальная газовая постоянная; μ, T и ρ — соответственно молярная масса, абсолютная температура и плотность газа. Из (11)

$$T=\frac{p\mu}{R\rho}$$

и температура в центре Солнца

$$T_ц = \frac{p_ц \mu}{R \rho_ц} = \frac{4\gamma \bar{\rho}_\odot M_\odot \mu}{R_\odot R \rho_ц}.$$

Наконец, можно упростить эту формулу, полагая $\rho_ц = 4\bar{\rho}_\odot$:

$$T_ц = \frac{\mu \gamma M_\odot}{R R_\odot}. \qquad (12)$$

В правой части этой формулы все известно, кроме μ. Преобладающий на Солнце химический элемент — водород. Молярная масса атомарного водорода равна массе $6{,}02 \cdot 10^{23}$ атомов водорода, так как грамм-молекула любого вещества содержит определенное число частиц (число Авогадро). Масса одного атома водорода $1{,}67 \cdot 10^{-24}$ г. Поэтому молярная масса атомарного водорода численно равна 1. В недрах Солнца водород ионизован и вместо одной частицы (атома водорода) там находятся две частицы (протон и электрон), т. е. на каждую частицу приходится $1:2 = 0{,}5$ единицы молярной массы. Следовательно, если допустить, во-первых, что Солнце состоит только из водорода и, во-вторых, водород полностью ионизован, то $\mu = 0{,}5$. Это очень похоже на более точное значение ($\mu = 0{,}6$), полученное в предположении, что масса водорода составляет 71% от массы вещества Солнца, гелия — 27% и остальных химических элементов — 2%.

Теперь остается вычислить $T_ц$ по (12), подставив в нее значения μ, γ, $M_\odot$, $R_\odot$ и R (не забудьте это сделать!). Тогда получим:

$$T_ц \approx 14 \cdot 10^6 \text{ K},$$

что близко к более точному значению $T_ц \approx 15 \cdot 10^6$ K.

«Модели» Солнца

Итак, мы оценили значение важнейших физических параметров в центре Солнца, рассматривая Солнце как шар с равномерно распределенным в нем веществом и плотностью $\rho = \bar{\rho}_\odot$. Теперь вы сами легко оцените p и T Солнца на глубине, равной половине радиуса $R_\odot/2$. Там давление

$$p_{1/2} = \bar{\rho}_\odot \frac{R_\odot}{2} g,$$

где

$$g = \frac{\gamma \frac{1}{8} M_\odot}{(R_\odot/2)^2} = \frac{1}{2} g_\odot.$$

Поэтому

$$p_{1/2} = \frac{1}{4} \frac{\gamma \bar{\rho}_\odot M_\odot}{R_\odot}, \qquad (13)$$

а температуру определяем по формуле:

$$T_{1/2}=\frac{\mu p}{R\bar{\rho}_{\odot}}=\frac{\mu}{4}\frac{\gamma M_{\odot}}{RR_{\odot}}. \quad (14)$$

Вычислите по этим формулам $p_{1/2}$ и $T_{1/2}$. Сравните (13) и (14) с (10) и (12).

Таким образом, мы с вами уже имеем представление о физических условиях на поверхности Солнца, в центре его и на промежуточной глубине. В принципе можно вычислить p, ρ, T на любой глубине и получить распределение этих параметров с глубиной, т. е. зависимости $p=p(r)$, $\rho=\rho(r)$, $T=T(r)$. Совокупность подобных зависимостей (их можно изобразить в виде графиков или таблиц) образует «модель» Солнца. Модель Солнца окажется более полной и будет ближе к реальному Солнцу, если знать не только, как с глубиной изменяются p, ρ и T, но и химический состав Солнца, а также, где и как Солнце вырабатывает энергию и каким образом осуществляется ее перенос. Ясно, что, например, при различных гипотезах относительно источников энергии и распределении химических элементов будут получаться различные зависимости: $p=p(r)$, $\rho=\rho(r)$, $T=T(r)$.

Техника расчета моделей Солнца и других звезд сложна. В нашей стране эта работа ведется под руководством А. Г. Масевич. Идея метода состоит в том, что мысленно разбивают Солнце (звезды) на шаровые слои одинаковой массы и рассматривают изменение параметров от слоя к слою. Использование ЭВМ облегчает эту трудную работу и позволяет проанализировать множество вариантов.

По современным представлениям, которые подробнее будут изложены в следующих параграфах, энергия Солнца выделяется лишь в «центральной области» Солнца (до 0,3 $R_{\odot}$ от центра), далее в зоне от 0,3 до 0,7 $R_{\odot}$ основную роль в процессе переноса энергии играет лучеиспускание (зона «лучистого равновесия»), а потом происходит смена механизма переноса энергии на конвекцию («конвективная зона»).

Надо хорошо понимать, что любая модель (а модели в науке о Вселенной используются не только в физике Солнца и звезд, но и в физике планет, а также и в космологии) создается с целью отражения главных, характерных черт моделируемого объекта. Выявление этих черт чрезвычайно важно для получения представлений о физической природе объекта, о законах, которым подчинено строение и развитие небесного тела. Модель звезды или ее атмосферы, модель планеты или ее атмосферы, модель Солнечной системы или модель Галактики, модель Метагалактики — все это не копии соответствующих объектов исследования, а скорее «контуры», помогающие нам постичь сущность объектов, отвлекаясь от огромного множества второстепенных «деталей».

ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ СОЛНЦА

На протяжении миллиардов лет Солнце ежесекундно излучает огромное количество энергии. Как и вообще все физические процессы, его излучение подчиняется важнейшему закону природы — закону сохранения и превращения энергии. Следовательно, энергия Солнца не может возникнуть из ничего, и существуют источники, поддерживающие непрерывное солнечное излучение. Что же это за источники?

Были предложены различные гипотезы. Согласно одной из них считалось, что тепловая энергия высвобождается при сжатии вещества Солнца. В другой гипотезе в качестве источника излучения рассматривался распад радиоактивных элементов. Оба эти процесса, конечно, сопровождаются выделением энергии, но, как показывают расчеты, не они являются главными источниками энергии Солнца и звезд.

Согласно современным представлениям, в недрах Солнца происходят термоядерные реакции, которые возникают лишь при очень высокой температуре и чрезвычайно чувствительны к ее изменениям. В ходе этих реакций, сопровождающихся большим выделением энергии, одни химические элементы превращаются в другие. Вы знаете, что самый распространенный элемент в звездах — водород. В недрах Солнца он ионизован и находится в виде ядер атомов водорода — протонов. Протоны, имеющие положительные электрические заряды, в обычных условиях отталкиваются друг от друга (закон Кулона). Но в недрах Солнца в условиях огромных температур скорость протонов настолько велика, что они способны сближаться, преодолевая электрические силы отталкивания. На очень близких расстояниях действуют мощные ядерные силы притяжения и начинаются ядерные реакции, т. е. процессы, в ходе которых возникают не химические соединения, а ядра новых химических элементов.

Внутри Солнца водород превращается в гелий. Рассмотрим один из возможных путей такого превращения. Слияние двух протонов (^1_1H) сопровождается образованием ядра тяжелого водорода дейтерия (^2_1D) и испусканием двух элементарных частиц: позитрона (e^+) и нейтрино (ν). Кратко эту реакцию можно записать так:

$$^1_1H + {^1_1H} \rightarrow {^2_1D} + e^+ + \nu.$$

Вероятность того, что два протона сумеют столкнуться и вступить в реакцию, очень мала. Но в недрах Солнца протонов очень много, а поэтому такие реакции в действительности могут происходить, хотя «время жизни» протонов относительно этой реакции составляет не менее 10 млн. лет.

Очень скоро образовавшийся в результате взаимодействия протонов дейтерий сам вступит в ядерную реакцию с протоном.

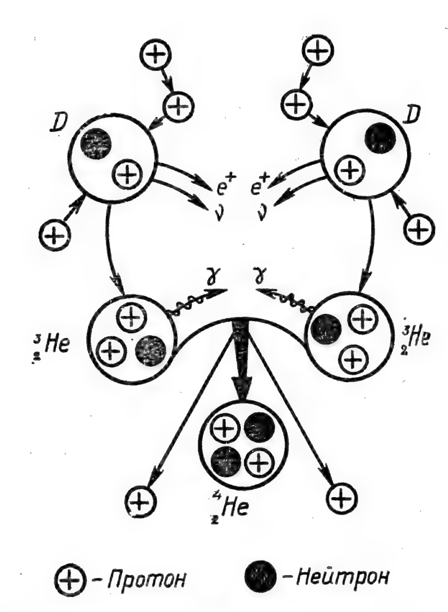


Рис. 4. Схематическое изображение реакций протон-протонного цикла.

Возникнет ядро легкого изотопа гелия (${}^3_2$He) и выделится энергия в виде коротковолнового гамма-излучения (γ):

$${}^2_1D + {}^1_1H \rightarrow {}^3_2He + \gamma.$$

В дальнейшем слияние двух ядер ${}^3_2$He приведет к образованию ядра гелия ${}^4_2$He и двух ядер водорода:

$${}^3_2He + {}^3_2He \rightarrow {}^4_2He + {}^1_1H + {}^1_1H.$$

Так как ядер изотопа гелия мало, а им еще нужно встретиться в неспокойной обстановке солнечных недр, то среднее «время жизни» частиц относительно такой реакции — миллионы лет.

Рассмотренная нами цепочка из трех реакций называется протон-протонным циклом. В результате протон-протонного цикла из четырех ядер водорода образуется одно ядро гелия (рис. 4). Какое же количество энергии выделяется при этом?

Масса одного протона в атомных единицах составляет 1,008 а. е. м., четырех — 4,032 а. е. м. Поскольку масса одного атома гелия 4,004 а. е. м., то разность 4,032 а. е. м.— —4,004 а. е. м. = 0,028 а. е. м. («дефект массы»). Так как 0,028 : 4,032 ≈ 0,007, то при синтезе 1 г водорода дефект массы составит примерно 0,007 г. Зная это и используя открытый Эйнштейном закон взаимосвязи массы и энергии ($\varepsilon = mc^2$), подсчитаем, сколько энергии выделяется при «сгорании» 1 г водорода:

$$\varepsilon = mc^2 = 0{,}007\ \text{г}\cdot\left(3\cdot 10^{10}\ \frac{\text{см}}{\text{с}}\right)^2 \approx 6{,}3\cdot 10^{18}\ \text{эрг}$$

($c = 3\cdot 10^{10}$ см/с — скорость света).

Какое количество энергии выделилось бы, если бы Солнце целиком состояло из водорода и весь водород превратился бы в гелий? На сколько лет хватило бы водорода для поддержания нынешней светимости Солнца?

Выполнив вычисления, необходимые для ответа на вопросы этой задачи, можно убедиться, что Солнце, хотя оно и не целиком состоит из водорода, будет светить так же, как сейчас, еще миллиарды лет.

Протон-протонный цикл не на 100% обеспечивает энергией

Солнце; вероятно, 3—5% энерговыделения поставляет углеродно-азотный цикл «C — N»:

$$\text{а) } {}^{12}_{6}C + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{13}_{7}N + \gamma \quad (1{,}3 \cdot 10^7 \text{ лет});$$

$$\text{б) } {}^{13}_{7}N \rightarrow {}^{13}_{6}C + e^+ + \nu \quad (7 \text{ мин});$$

$$\text{в) } {}^{13}_{6}C + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{14}_{7}N + \gamma \quad (2{,}7 \cdot 10^6 \text{ лет});$$

$$\text{г) } {}^{14}_{7}N + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{15}_{8}O + \gamma \quad (3{,}2 \cdot 10^8 \text{ лет});$$

$$\text{д) } {}^{15}_{8}O \rightarrow {}^{15}_{7}N + e^+ + \nu \quad (82 \text{ с});$$

$$\text{е) } {}^{15}_{7}N + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{12}_{6}C + {}^{4}_{2}He \quad (1{,}1 \cdot 10^5 \text{ лет}).$$

${}^{13}_{7}N$ и ${}^{15}_{8}O$ — радиоактивные, т. е. самораспадающиеся, изотопы азота и кислорода.

Рядом с каждой реакцией указано ее «среднее время»; реакции б) и д) представляют собой распад радиоактивных изотопов азота и кислорода. В цикле «C — N» водород превращается в гелий при участии углерода, выступающего в качестве катализатора. Такой цикл может играть некоторую роль на Солнце и более заметную роль в недрах звезд, в глубинах которых температура выше, чем на Солнце.

Обратите внимание на то, что часть энергии в протон-протонном и углеродно-азотном циклах уносит поток нейтрино. Нейтрино — элементарные частицы, не имеющие заряда и массы покоя. Нейтрино способны почти без взаимодействия с веществом проникать сквозь толщу всей звезды, унося некоторое количество энергии непосредственно из центральных областей звезды. Огромная проникающая способность нейтрино делает их трудноуловимыми: их невозможно непосредственно зарегистрировать какими-либо обычными счетчиками элементарных частиц. Между тем сделать это крайне важно и интересно, так как нейтринное излучение, в отличие от всех других видов излучения, как бы позволяет «заглянуть» в недра Солнца. Первые «нейтринные телескопы» — приборы для обнаружения нейтрино — уже построены и установлены глубоко под землей, куда никакие другие частицы из космоса проникнуть не могут. «Нейтринные телескопы» не имеют ничего общего с оптическими и радиотелескопами. Это огромные цилиндрические резервуары, наполненные сотнями тысяч литров жидкости, богатой изотопом хлора с молекулярной массой 37. Улавливая нейтрино, атомы изотопа хлора превращаются в атомы радиоактивного изотопа аргона с молекулярной массой 37, появление которого может быть зафиксировано специальными счетчиками. Нейтринные наблюдения Солнца позволят выяснить, насколько верна общепринятая гипотеза об источниках энергии Солнца.

Открытие источника энергии Солнца имеет важное значение для понимания процессов, происходящих внутри Солнца. Кроме

того, оно послужило толчком к поискам путей технического использования термоядерного синтеза в земных условиях, к использованию неисчерпаемой энергии термоядерного синтеза в мирных целях, на благо человечества.

Просто подражать природе оказалось совершенно невозможно. В земной лаборатории реакция $^1_1H + ^1_1H \rightarrow ^2_1D + e^+ + \nu$, по всей вероятности, неосуществима: медленные темпы процессов на Солнце для земных лабораторий неприемлемы; в земных лабораториях невозможно ни удержать плазму, ни создать систему теплоизоляции, скопировав «конструктивное решение» солнечного термоядерного реактора. Напомним, что солнечный ядерный реактор имеет оригинальную конструкцию: плазма удерживается гравитационными силами, а термоизоляцию обеспечивают колоссальные толщи вещества, отделяющие реактор от излучающей поверхности. Вот и пришлось людям позаимствовать у природы лишь идею термоядерного синтеза и самим создавать условия для его осуществления на Земле. Поэтому никогда ни «токамаки» (тороидальные камеры со стабилизирующим собственным магнитным полем тока в плазме), ни «стеллараторы» (камеры, в которых плазма удерживается внешним магнитным полем), ни различные другие ныне действующие и проектируемые термоядерные установки не были «копией Солнца» — они дело ума и рук человека.

ОБЗОР ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА СОЛНЦЕ

Теперь, суммируя все, что мы знаем о Солнце, попробуем нарисовать общую картину происходящих на нем процессов. Начнем с термоядерного реактора, с «конструкцией» которого мы уже знакомы. Но об одной его замечательной особенности пока еще ничего не было сказано: солнечный термоядерный реактор — самоуправляемый. Именно благодаря этому поддерживается постоянная светимость Солнца стационарной звезды, которая находится в механическом и тепловом равновесии. Напомним, что при механическом равновесии звезды сила тяжести уравновешивается силой газового давления. При тепловом равновесии энергия, вырабатываемая внутри звезды, равна энергии, излучаемой ею.

В результате работы термоядерного реактора выделяется энергия преимущественно в виде гамма-квантов высоких энергий. Эта энергия переносится из недр Солнца наружу (в космическое пространство) через огромную толщу раскаленной плазмы (рис. 5). От 0,3 до 0,7 радиуса Солнца (считая от центра) энергия передается излучением от слоя к слою. При таком «лучистом переносе» слои не меняются своими местами, а энергия, излученная нижним слоем, поглощается верхним и затем переизлучается им и т. д. Происходит очень медленное, длящееся миллионы лет «просачивание» излучения от центра

Солнца к поверхности. Каждый последующий слой излучает менее энергичные кванты, чем предыдущий. Поэтому хотя в центральных областях Солнца вырабатываются гамма-кванты, но далее они последовательно превращаются в кванты рентгеновских лучей, затем в ультрафиолетовые и, наконец, вблизи поверхности в кванты видимого света.

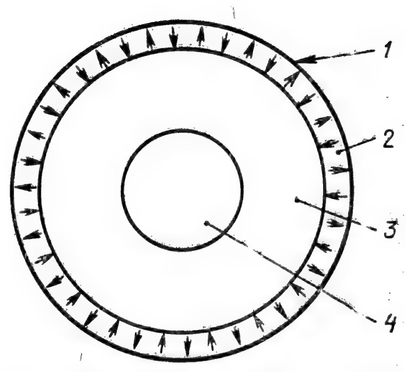


Рис. 5. Внутреннее строение Солнца: *1* — фотосфера; *2* — конвективная зона; *3* — зона переноса энергии излучением; *4* — зона ядерных реакций.

Примерно на расстоянии 0,3 радиуса Солнца от его поверхности основным процессом переноса энергии из глубины наружу становится другой известный из физики способ передачи тепла — конвекция. Конвективная зона, т. е. та часть солнечного шара, в которой тепло передается конвекцией, простирается до фотосферы. О происходящей в подфотосферных слоях конвекции свидетельствует, как мы уже знаем, грануляция на поверхности Солнца. Конвекция приходит на помощь лучистому переносу энергии там, где температура уменьшилась, возросла непрозрачность вещества (так как в среде стало больше нейтральных атомов, способных поглощать излучение) и лучистый перенос перестал справляться со своей задачей. Конвективные потоки устремляются к фотосфере Солнца со скоростью нескольких десятков метров в секунду, т. е. значительно быстрее лифтов в высотных зданиях. С подъемом скорость конвективных потоков растет, достигая в подфотосферных слоях 1—2 км/с. Газовые массы, выполнив задачу по переносу тепловой энергии, охлаждаются и снова ныряют в глубины Солнца, чтобы помочь лучистому переносу.

В фотосфере основным переносчиком энергии вновь становится лучеиспускание. Разогнавшиеся конвективные потоки резко тормозятся, передавая часть своей кинетической энергии фотосфере. Фотосфера начинает колебаться подобно гигантской мембране. Эти колебания порождают различные волны. Одни из них распространяются вдоль фотосферы, а другие — вверх. Некоторые из устремившихся вверх волн, испытав отражение и преломление в атмосфере, возвращаются вниз. Но особенно интересны те, которых не сломили препятствия. Они попадают в более разреженные, чем фотосфера, области атмосферы Солнца, скорость волн резко возрастает и, когда она превзойдет скорость звука в окружающей среде, волны превратятся в ударные. Действие ударной волны хорошо известно из физики взрывов. Ударная волна приводит в движение большие массы

вещества. Именно эти волны, затухая, нагревают хромосферу и корону. Вблизи фотосферы на высотах до тысячи километров температура растет очень медленно, потому что здесь вещество еще довольно плотное и оно интенсивно излучает энергию. Но вот выше картина иная: разреженная среда излучает мало энергии (свечение солнечной короны, например, ничтожно по сравнению с фотосферой), и приносимая волнами энергия разогревает хромосферу и корону. Поэтому в хромосфере температура и вместе с ней ионизация начинают расти. Рост температуры сдерживается при $50 \cdot 10^3$ К, так как активную роль в излучении играет гелий. Когда же и он ионизуется, рост температуры приводит к «корональным» значениям 10^6—$2 \cdot 10^6$ К. Как расходует приносимую энергию солнечная корона? Часть энергии идет вниз (корона греет хромосферу), значительная часть — на многократную ионизацию железа, никеля, кальция, часть расходуется на радиоизлучение и рентгеновское излучение, наконец, энергия (вместе с частицами вещества) уносится и солнечным ветром. Так работает удивительная тепловая солнечная машина.

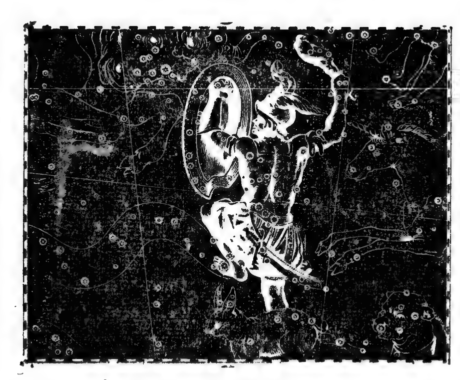
До сих пор во всех наших рассуждениях не учитывались магнитные поля в активных областях Солнца. Между тем именно с магнитными полями связано многообразие наблюдаемых на Солнце явлений. Магнитное поле не влияет на движение нейтрального газа, но оно может иметь определяющее значение для движения ионизованного газа. Например, сильное магнитное поле способно замедлить конвекцию, что и принято считать причиной охлаждения вещества в солнечных пятнах. Сильное магнитное поле «сковывает» ионизованный газ и способствует появлению пятен «магнитных островов», окруженных турбулентной фотосферой. Слабое поле, наоборот, ускоряет конвекцию, и в тех местах Солнца, где такое поле возникает, появляются более горячие участки — фотосферные факелы. Теория происхождения пятен и факелов сложна и во многом еще далека от завершения, но в основе физики этих явлений лежит анализ движения конвективных потоков ионизованного газа в магнитном поле.

Еще более наглядно магнитное поле на Солнце проявляет себя в явлениях, разыгрывающихся в атмосфере Солнца. На кинокадрах, запечатлевших развитие протуберанцев, отчетливо видно, как движущееся вещество протуберанцев «проявляет» невидимые силовые линии магнитных полей. А проникая еще выше — в солнечную корону, магнитные силовые линии образуют в разреженной плазме ту неповторимую лучистую структуру, которая производит незабываемое впечатление на каждого, кто хотя бы раз в жизни видел в телескоп корону во время полного солнечного затмения. Это из-за магнитного поля корональные образования, расположенные на громадной высоте над фотосферой, вращаются с той же угловой скоростью, что и

находящиеся под ними участки фотосферы, и длительное время сохраняют свою форму.

О том, как велика энергия, запасенная в магнитном поле, можно судить хотя бы по тому, что именно отсюда черпают энергию хромосферные вспышки — грандиозные взрывы в атмосфере Солнца. Замечено, что вспышки возникают над группами пятен, имеющими очень сложную и быстро изменяющуюся структуру магнитных полей. На большом расстоянии от пятен их магнитное поле сходно с полем соленоида, в котором протекает гигантский ток (10^{11}—10^{12} А). Взаимодействие магнитных полей в сложных группах пятен может привести в движение плазму и стать причиной появления солнечных вспышек. Теория хромосферных вспышек только лишь разрабатывается. Она связывает происходящие при вспышках уплотнение и разогрев плазмы с давлением магнитных полей и выделением джоулева тепла, а внезапное начало вспышек — с возникновением резкой плазменной неустойчивости и разрушением магнитного поля. Хромосферные вспышки не только «возмущают» солнечную корону, но и, как мы знаем, вызывают различные явления на Земле.

3 Заказ № 171



МИР СОЛНЦ — ЗВЕЗДЫ

Не устану воспевать вас, звезды!
Вечно вы таинственны и юны.
С детских лет я робко постигаю
Темных бездн сияющие руны.

И. А. Бунин

Мир звезд для нас не совсем нов, так как мы уже знакомы с природой Солнца — типичной звезды. Это поможет нам представить себе звезды, каждая из которых даже в телескоп видна как точечный светящийся объект. В этих как бы слегка размытых точках, на самом деле оказавшихся огромными раскаленными плазменными шарами, сосредоточено, вероятно, более 99% массы космического вещества. Остальное вещество находится преимущественно в виде разреженной межзвездной среды. На долю планет, как мы потом убедимся на примере Солнечной системы, вещества приходится совсем немного (по сравнению со звездами).

ПРИРОДА ЗВЕЗД

Определение расстояний до звезд

Прежде всего напомним, что звезды находятся несравненно дальше, чем тела Солнечной системы. Даже от ближайших звезд свет идет несколько лет.

Во сколько раз световой год больше астрономической единицы?

Расстояния до ближайших звезд определяют по их годичному параллаксу. Это угол (π), под которым со звезды был бы виден средний радиус земной орбиты (a, равный 1 а. е.), расположенный перпендикулярно направлению на звезду. В тех случаях, когда удается определить величину π, расстояние до звезды есть:

$$\Delta = \frac{a}{\sin \pi}. \qquad (15)$$

Угол π всегда очень мал (меньше $1''$). Поэтому формулу (15) можно записать в виде:

$$\Delta = \frac{206\,265a}{\pi}. \qquad (16)$$

Расстояние до звезды, которое соответствует параллаксу 1″, называется парсеком (от слов «параллакс-секунда»), пс:

$$1 \text{ пс} = 206\,265 \text{ а. е.}$$

Очевидно, что расстояние до звезды в парсеках легко вычислить по формуле:

$$\Delta = \frac{1}{\pi}. \quad (17)$$

Сколько световых лет содержится в одном парсеке?

Самая близкая к нам звезда находится в созвездии Центавра (Проксима Центавра). Ее годичный параллакс 0″,762.

Вычислите расстояние до Проксимы Центавра в парсеках и световых годах.

Менее чем полтора века назад удалось впервые определить расстояние до звезды (Веги), а сейчас уже известны параллаксы нескольких тысяч звезд. При измерении расстояний до космических объектов, удаленных на тысячи парсек (1000 парсек= =1килопарсек=1 кпс) или миллионы парсек (1 000 000 пс= =1 мегапарсек=1 Мпс), применяются другие методы (см. с. 37, 68, 74).

Цвет и температура звезд

Вы уже знаете, что звезды имеют различный цвет. Подобно тому как по цвету раскаленного металла можно судить о его температуре, цвет звезды свидетельствует о температуре ее поверхностного слоя. Наше Солнце — желтая звезда. Такого же цвета и Капелла, температура которой около 6000 К. Звезды, имеющие температуру 3500—4000 К, красноватого цвета (Альдебаран). Температура красных звезд (Бетельгейзе) примерно 3000 К. Самые холодные из известных в настоящее время звезд имеют температуру менее 2000 К. Такие звезды доступны наблюдениям в инфракрасной части спектра.

Известно много звезд более горячих, чем Солнце. К ним относятся голубоватые и белые звезды (Спика, Сириус, Вега) с температурой 10 000—20 000 К. Реже встречаются голубовато-белые и голубые звезды с температурой поверхности 30 000—50 000 К. В недрах звезд температура не менее десяти миллионов градусов.

Спектры и химический состав звезд

Важнейшие сведения о природе звезд астрономы получают, расшифровывая их спектры. Спектры большинства звезд, как и Солнца,— это спектры поглощения: на фоне непрерывного спектра видны темные линии.

Спектры звезд отличаются друг от друга распределением лучистой энергии в непрерывном спектре, а также количеством и интенсивностью линий. Сходные между собой спектры удалось сгруппировать в семь основных классов. Они обозначаются

прописными буквами латинского алфавита, расположенными в следующем порядке:

O—B—A—F—G—K—M.

Внутри каждого класса существует разделение еще на десять подклассов. Например, спектральный класс F имеет следующие подклассы:

F0—F1—F2—F3—F4—F5—F6—F7—F8—F9.

Последовательность спектральных классов отражает различие цвета и температуры звезд. В этом легко убедиться, рассматривая таблицу:

Спектральный класс	Температура, K	Цвет
O	50 000	Голубоватый
BO	25 000	Голубовато-белый
AO	11 000	Белый
FO	7600	Желтоватый
GO	6000	Желтый
KO	5120	Красноватый
MO	3600	Красный

В основном звезды имеют сходный химический состав: самые распространенные элементы в них, как и на Солнце,— водород и гелий. Разнообразие звездных спектров объясняется прежде всего тем, что звезды имеют разную температуру. От температуры зависит физическое состояние, в котором находятся атомы вещества в звездных атмосферах, и вид спектра. При сравнительно невысоких температурах (красные звезды) в атмосферах звезд могут существовать атомы и даже простейшие молекулы (C_2, CN, TiO, ZrO и др.). В атмосферах горячих (голубых и белых) звезд преобладают ионизованные атомы.

Познакомимся с важнейшими особенностями спектров звезд различных спектральных классов.

Класс O. Непрерывный спектр таких звезд пересечен темными линиями поглощения, характерными для ионизованного гелия, азота, кислорода. В атмосферах этих звезд, конечно, имеются и другие химические элементы, но благодаря высокой температуре атомы многих химических элементов оказываются многократно ионизованными. Спектральные линии многократно ионизованных атомов находятся в ультрафиолетовой области спектра, которая поглощается земной атмосферой.

Класс B. Эти звезды часто называют гелиевыми, так как в их спектрах много линий поглощения нейтрального гелия.

Класс A. Наиболее интенсивны линии поглощения водорода.

Класс F. Линии водорода слабеют, но зато появляются линии поглощения, свойственные ионизованным металлам, например кальцию.

Класс G. В спектре этих звезд, как и в спектре Солнца, много линий поглощения, принадлежащих ионизованным и нейтральным атомам металлов. Линии водорода, которого много в атмосферах звезд, ослаблены. Это объясняется тем, что при температуре, свойственной звездам класса G, поглощение света водородом становится менее существенным, чем в атмосферах более горячих звезд.

Класс K. Кроме линий поглощения металлов, в спектрах этих звезд видны полосы, принадлежащие молекулярным соединениям.

Класс M. В спектрах этих (и более холодных) звезд выделяются молекулярные полосы поглощения (особенно окиси титана).

Светимости и абсолютные звездные величины

Звезды, как и Солнце, излучают энергию в диапазоне всех длин волн электромагнитных колебаний. Полное количество энергии, излучаемое звездой по всем направлениям в одну секунду, называется светимостью. Это одна из важнейших характеристик звезды. Светимость обозначается буквой L. Светимость Солнца ($L_{\odot} \approx 4 \cdot 10^{33}$ эрг/с) принята за единицу светимости.

О светимости звезд нельзя судить по их видимой звездной величине, так как звезды находятся от нас на различных расстояниях. Звездные величины, которые имели бы звезды, если бы они находились на одинаковом расстоянии (10 пс), называются абсолютными звездными величинами (M).

Из школьного курса астрономии известно, что

$$M = 5 - 5 \lg r + m, \tag{18}$$

где M — абсолютная звездная величина; r — расстояние до звезды; m — видимая звездная величина.

Зная, что видимая звездная величина Солнца $m_{\odot} = -26^m,8$, а расстояние до него $r_{\odot} = 1/206265$ пс, вычислите абсолютную звездную величину Солнца $M_{\odot}$.

Если же абсолютная величина звезды определена другим способом, например по спектру звезды, то из формулы (18) можно найти расстояние до звезды:

$$\lg r = \frac{m - M + 5}{5}. \tag{19}$$

Экваториальные координаты яркой звезды $\alpha = 18^ч35^м$, $\delta = +38°44'$. Какая это звезда? Вычислите расстояние до нее (в парсеках), если известно, что видимая и абсолютная звездные величины ее соответственно равны $+0^m,1$ и $+0^m,5$.

Формула, связывающая абсолютные звездные величины и светимости звезд, аналогична известному вам соотношению между блеском звезды и ее видимой величиной:

$$\frac{L_1}{L_2}=2{,}512^{(M_2-M_1)}, \qquad (20)$$

где L_1 и L_2 — светимости двух звезд, а M_1 и M_2 — их абсолютные звездные величины.

Если в качестве одной из звезд выбрать Солнце, то

$$\frac{L}{L_\odot}=2{,}512^{(M_\odot-M)}, \qquad (21)$$

где буквы без индексов относятся к любой звезде, а со значком — к Солнцу.

Так как светимость Солнца принимается за единицу, то из (21) следует, что

$$L=2{,}512^{(M_\odot-M)},$$

или

$$\lg L=0{,}4\,(M_\odot-M). \qquad (22)$$

По формуле (22) можно вычислить светимость любой звезды, у которой известна абсолютная звездная величина.

Вычислите светимость Сириуса, если известно, что его видимая звездная величина $-1^m{,}5$, а свет от него идет до Земли 8,7 лет. Принять абсолютную звездную величину Солнца равной $+4^m{,}8$.

Звезды имеют различную светимость. Звезды, светимость которых в сотни и тысячи раз превосходит светимость Солнца, называются гигантами и сверхгигантами. Пример *звезды-гиганта* — α Тельца (*Альдебаран*), светимость которой почти в 120 раз больше светимости Солнца ($L\approx120$). Пример *звезды-сверхгиганта* — β Ориона (*Ригель*, $L\approx20\,000$).

Звезды, светимость которых сравнима со светимостью Солнца или меньше ее, называются звездами-карликами. Например, светимость звезды, известной под названием Крюгер 60А, $L\approx0{,}006$.

Сравните светимость Солнца со светимостью одной из исключительно слабых звезд-карликов, абсолютная звездная величина которой $+19^m{,}2$.

Является ли Солнце по своей светимости необычной звездой?

Двойные звезды

При остром зрении даже невооруженным глазом рядом со звездой *Мицар* (средняя звезда в ручке ковша Большой Медведицы) можно увидеть слабую звездочку (5^m) — *Алькор*. Мицар и Алькор — наиболее известная двойная звезда. Двойных звезд много. Возможно, что более половины всех звезд представляют собой физические двойные системы, в которых каждая из двух звезд совершает движение вокруг общего центра масс системы.

Звезды, двойственность которых можно обнаружить при телескопических наблюдениях (или даже невооруженным глазом), называются визуально-двойными. Обычно это физически связанные звезды (их отличают от оптических двойных звезд). Периоды обращения физических двойных звезд могут быть от нескольких лет до нескольких сотен лет.

Пусть из наблюдений визуально-двойной звезды удалось определить угловое расстояние между компонентами a'' и годичный параллакс π''. Покажите, что большая полуось орбиты двойной звезды будет:

$$A = \frac{a''}{\pi''} \text{ а.е.} \quad (23)$$

Расстояние между наиболее яркими компонентами (A и B) визуально-двойной звезды α Близнецов (Кастор) примерно 100 а. е., а период обращения около 500 лет. Звезды A и B Кастора, в свою очередь, тоже двойные. Но их двойственность невозможно обнаружить при визуальных или фотографических наблюдениях, потому что компоненты находятся на расстоянии всего лишь несколько сотых долей астрономической единицы (соответственно малы и периоды обращения). Такие тесные пары двойных звезд называются спектрально-двойными, так как лишь спектральные наблюдения могут показать, что перед нами не одна звезда, а две. Орбитальные скорости компонентов двойных звезд имеют всегда противоположные направления. Согласно эффекту Допплера, линии в спектре звезды, приближающейся к нам, смещаются к фиолетовому концу, а удаляющейся — к красному. Поэтому линии в спектрах спектрально-двойных звезд периодически раздваиваются.

Интересно, что Кастор состоит не из четырех, а из шести звезд. Вблизи звезд A и B обнаружена слабая звезда (Кастор C), которая оказалась спектрально-двойной звездой с периодом обращения около 19 ч.

Нередко двойственность тесных пар звезд можно выявить, изучая периодические изменения их блеска. Если прямая, проходящая через центр масс двойной звезды и наблюдателя, лежит в плоскости орбиты визуально-двойной звезды, то могут наблюдаться затмения, при которых одна звезда на время заслоняет от нас другую. Такие звезды называются затменными двойными или затменно-переменными.

По многократным наблюдениям затменно-переменной звезды можно построить кривую блеска. Если сравнить звездные величины в минимуме и максимуме блеска, то мы получим амплитуду изменения блеска. Измерив промежуток времени между двумя последовательными максимумами (или минимумами), найдем период изменения блеска.

На рисунке 6 изображена кривая блеска типичной затменно-переменной звезды β Персея, названной арабами Алголем («Звезда Дьявола»). Рядом показано схематическое изображение компонентов в момент, когда горячая центральная звезда заслонена от нас более холодным спутником. Пользуясь

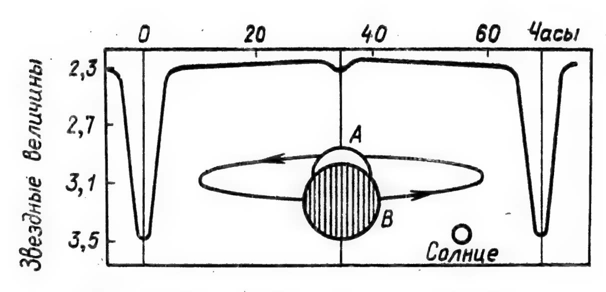


Рис. 6. Кривая блеска Алголя (β Персея).

рисунком, объясните причины минимумов блеска, а также определите амплитуду и период звезды β Персея.

Из анализа кривых блеска затменных переменных звезд можно определить ряд важных физических характеристик звезд, например их радиусы. На этом основан один из методов определения размеров звезд.

Оказывается, что и по своим размерам, Солнце — рядовая звезда. Существуют звезды, значительно большие и меньшие, чем Солнце. Наибольшие размеры имеют сверхгиганты. Их радиусы в сотни раз превосходят радиус Солнца.

Определение масс звезд из наблюдений визуально-двойных звезд

К системам двойных звезд применимы закон всемирного тяготения и уточненные Ньютоном законы Кеплера. Пусть массы компонентов двойной звезды будут M_1 и M_2, P — период обращения, A — большая полуось орбиты. Движение небесных тел в этой системе можно сопоставить с движением Земли вокруг Солнца. Если принять массу Солнца за единицу ($M_{\odot} = 1$), а также вспомнить, что период обращения Земли вокруг Солнца равен 1 году, среднее расстояние Земли от Солнца 1 *а. е.* и, наконец, масса Земли пренебрежимо мала по сравнению с массой Солнца, то получим:

$$M_1 + M_2 = \frac{A^3}{P^2}. \qquad (24)$$

Учитывая формулу (23), (24) запишем в виде:

$$M_1 + M_2 = \frac{(a'')^3}{(\pi'')^3 P^2}. \qquad (25)$$

Вычислите сумму масс двойной звезды α Центавра ($\pi = 0'',76$), если спутник, находящийся от главной звезды на расстоянии 17″,65, имеет период обращения около 80 лет.

Что необходимо знать для вычисления M_1 и M_2, т. е. массы каждой звезды?

Массы звезд различны. Однако в отличие от светимостей и размеров массы звезд заключены в сравнительно узких преде-

лах: самые массивные звезды лишь в десятки раз превосходят Солнце, а наименьшие массы звезд составляют примерно 0,07 $M_{\odot}$.

Средние плотности звезд

Так как размеры звезд различаются значительно больше, чем их массы, то и средние плотности звезд сильно отличаются друг от друга. У гигантов и сверхгигантов плотность очень мала. Например, плотность Бетельгейзе около 10^{-6} г/см³. Вместе с тем существуют чрезвычайно плотные звезды. К ним относятся небольшие по размерам «белые карлики» (их белый цвет обусловлен высокой температурой). Например, плотность белого карлика Сириус *B* более 40 000 г/см³. В настоящее время известны значительно более плотные белые карлики ($10^7 - 10^8$ г/см³).

Сравните средние плотности Бетельгейзе, Солнца и белого карлика Сириус *B*.

Еще до открытия спутника Сириуса (Сириус *B*) было известно, что Сириус — двойная звезда. Вывод о существовании Сириуса *B* был сделан на основе наблюдаемых отклонений в движении Сириуса *A*. Эти отклонения вызваны притяжением невидимого «спутника» белого карлика.

Особенности карликов и гигантов

Белые карлики и гиганты (сверхгиганты) резко отличаются от Солнца и ему подобных звезд своими физическими характеристиками (например, светимостью, размерами, средней плотностью). Такие «внешние» отличия отражают глубокие отличия во внутреннем строении звезд, источниках их энергии, механизме переноса энергии. В свою очередь, перечисленные отличия обусловлены тем, что звезды, подобные Солнцу, гиганты и белые карлики представляют собой звезды различного возраста. Современная астрофизика неотделима от идеи эволюции небесных тел. Об этом мы будем говорить дальше, а сейчас рассмотрим особенности строения белых карликов и гигантов.

Огромные плотности белых карликов объясняются свойствами вещества этих звезд, которое представляет собой почти оголенные атомные ядра и оторванные от них электроны. Расстояния между атомными ядрами в веществе белых карликов должны быть в десятки и даже сотни раз меньше, чем в твердых и жидких телах, с которыми мы встречаемся в земных условиях. Агрегатное состояние, в котором находится это вещество, нельзя назвать ни жидким, ни твердым, так как атомы белых карликов разрушены. Мало похоже это вещество на «обычный» газ, хотя его можно считать «газом», учитывая, что расстояния между частицами даже в плотных белых карликах во много раз больше, чем сами ядра атомов или электроны.

В отличие от обычного газа, вещество белых карликов представляет собой «вырожденный газ», который не подчиняется

газовым законам, известным вам из классической физики. Не углубляясь в вопросы, относящиеся к квантовой механике, отметим лишь некоторые свойства вырожденного газа, из которого состоят белые карлики. Давление такого газа (а значит, и равновесие белого карлика) почти не зависит от температуры (!) и сильно зависит от плотности. Уравнению Клапейрона в физике вырожденного газа соответствует уравнение

$$p = k\rho^{5/3}, \qquad (26)$$

где p — давление; ρ — плотность; k — const.

Сравните эту формулу с уравнением состояния идеального газа.

«Модель» белого карлика в известном смысле проще «модели» Солнца, так как почти весь белый карлик состоит из вырожденного газа (за исключением тонкой оболочки — она состоит из невырожденного газа). Такие звезды не имеют термоядерных реакторов. Они просто остывают.

Гигантские и сверхгигантские звезды моложе белых карликов. Такими звезды становятся, когда водород в их центральных областях полностью выгорает, и там, где раньше располагался термоядерный реактор, образуется горячее и очень плотное ядро, по своим свойствам весьма напоминающее белый карлик. В подобном ядре энергия, как мы знаем, не вырабатывается, но в прилегающем к нему тонком слое происходят термоядерные реакции. Выделяющаяся в ходе этих реакций энергия переносится в основном конвекцией в протяженную оболочку гигантских звезд. Таковы в самых общих чертах особенности «моделей» гигантов.

Сравните «модели» звезд: звезд типа нашего Солнца, белых карликов и гигантов.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ В МИРЕ ЗВЕЗД

Звезды, как и Солнце, представляют собой «саморегулируемые» или «самосогласованные» системы. В таких системах должна существовать связь между различными физическими характеристиками. Ее и на самом деле удалось обнаружить путем сопоставления физических характеристик звезд (эмпирический путь), а затем получить и теоретическим путем.

Диаграмма «спектр — светимость»

В начале нынешнего века голландский астроном Герцшпрунг и американский астроном Рессел независимо друг от друга обнаружили, что существует связь между спектрами звезд и их светимостями. Эта связь представляет собой график (или диаграмму), по горизонтальной оси которого отложены спектральные классы (или температуры) звезд, а по вертикальной светимости (или абсолютные величины) звезд (рис. 7). Звезды на такой диаграмме, получившей название диаграмма «спектр —

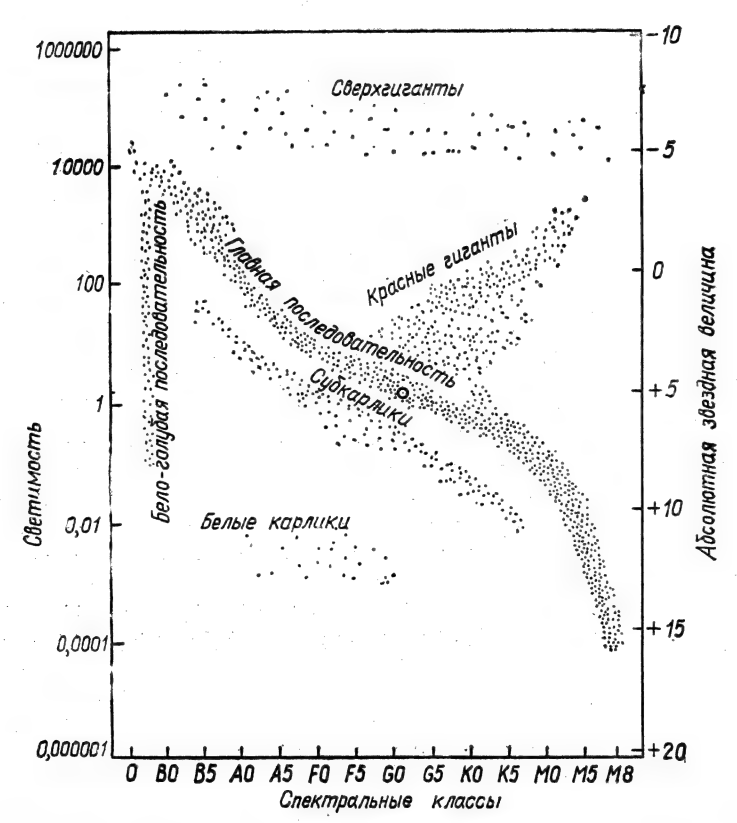


Рис. 7. Диаграмма «спектр — светимость».

светимость», изображаются точками. Если бы спектральные классы и светимости звезд были независимыми физическими характеристиками, то в расположении точек на диаграмме не было бы каких-либо закономерностей. Но точки на диаграмме группируются в пределах нескольких областей, названных последовательностями. Наиболее заметна главная последовательность, простирающаяся от горячих сверхгигантов до холодных красных карликов. К ней принадлежит больше всего звезд, включая Солнце. Рассматривая главную последовательность, можно заметить, что, чем горячее относящиеся к ней звезды, тем большую светимость они имеют.

Обособленно от главной последовательности в разных частях диаграммы сгруппированы сверхгиганты и белые карлики. Диаграмма «спектр — светимость» показывает, что звезды данного спектрального класса не могут иметь произвольную светимость и, наоборот, звезды с определенной светимостью не могут иметь любую температуру.

Существуют ли звезды спектрального класса А с абсолютной звездной величиной, равной $+4^m$?

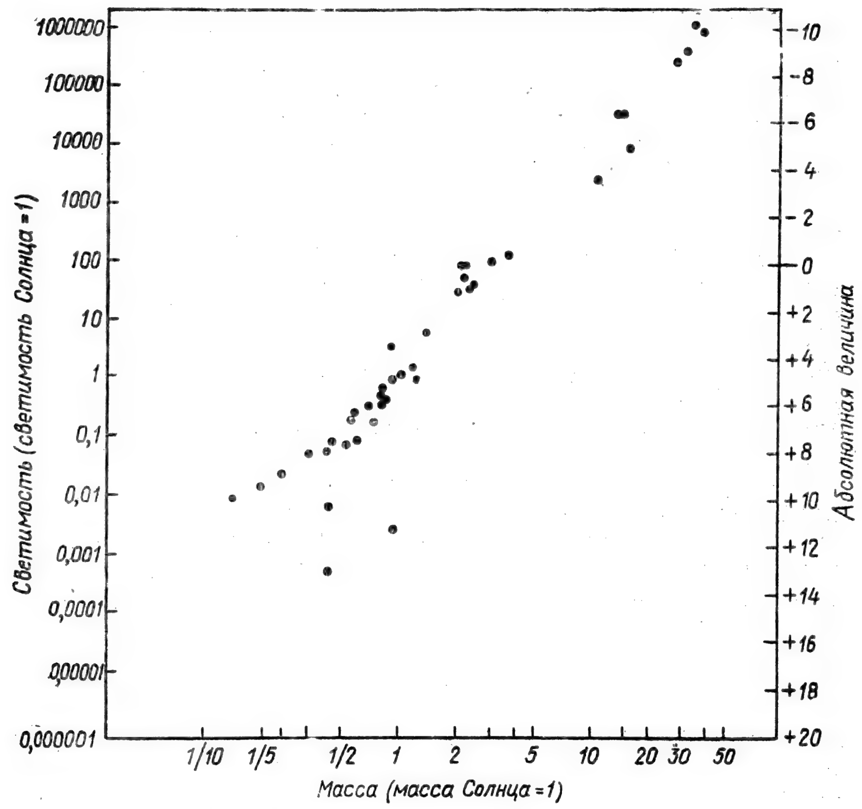


Рис. 8. Диаграмма «масса — светимость» [1].

Может ли светимость звезды спектрального класса В превышать светимость Солнца в 10 000 раз?

Существуют ли звезды, светимость которых в 100 раз меньше светимости Солнца, а температура около 30 000 К?

Пользуясь диаграммой «спектр — светимость», оцените абсолютную звездную величину Солнца (G2), Бетельгейзе (М2), Денеба (А2).

Диаграмма «масса — светимость»

Масса — важнейшая физическая характеристика звезды. Существует связь между массой звезды и ее светимостью. Наглядное представление об этом дает диаграмма (рис. 8), по одной оси которой отложены массы звезд, а по другой — их светимости (или абсолютные звездные величины). Из диаграммы видно, что, чем больше масса звезды, тем больше ее светимость. Светимость примерно пропорциональна четвертой степени массы звезды ($L \sim M^4$).

[1] Для построения диаграммы «масса — светимость» использовались обычные звезды (т. е. звезды, принадлежащие главной последовательности).

Другие закономерности

Диаграммы «спектр — светимость» и «масса — светимость» отражают наиболее существенные закономерности в мире звезд, установленные из анализа наблюдений за звездами. С некоторыми другими закономерностями (например, связывающими цвет звезды с температурой ее фотосферы) вы уже знакомы. Известно вам также, что массы звезд заключены в определенном интервале и что в химическом составе преобладают водород и гелий.

Важная связь установлена между скоростью вращения звезд и их спектральными классами. Некоторые звезды (преимущественно относящиеся к спектральным классам O и B) вращаются с очень большой скоростью, достигающей на экваторе 200—400 км/с. Солнце, как и многие другие звезды, относящиеся к спектральным классам F, G и K, вращается значительно медленнее: линейная скорость вращения на экваторе Солнца составляет лишь 2 км/с.

Как же удалось установить вращение звезд вокруг осей? Вращение Солнца, как вы знаете, легко обнаружить, наблюдая перемещение деталей на его поверхности. Рассмотреть же какие-либо детали на поверхности хотя бы ближайших звезд совершенно невозможно, даже в самые крупные современные телескопы. Оказывается, доказать вращение звезд вокруг осей можно, анализируя их спектры. Поясним это на примере наблюдения затменной двойной звезды. Представим, что темный спутник частично закрыл главную звезду. Тогда до наблюдателя доходит свет лишь от одного края затмившейся звезды. Если эта звезда вращается и в данный момент мы видим удаляющийся от нас край звезды, то, согласно эффекту Допплера, линии в спектре будут смещены к красному концу. Через некоторое время, когда темный спутник переместится по своей орбите и до наблюдателя будет доходить свет от другого (приближающегося) края звезды, линии в спектре сместятся к фиолетовому концу. В результате в спектре вращающейся звезды будет наблюдаться некоторое расширение линий, по которому можно судить о скорости вращения звезды вокруг оси.

Какие звезды вращаются быстрее: те, у которых массы велики или малы?

ЗВЕЗДЫ, НЕ ПОХОЖИЕ НА СОЛНЦЕ

Мы знаем, что, несмотря на многочисленные и весьма разнообразные проявления своей активности, Солнце относится к стационарным звездам. Масса, светимость и размеры этих звезд длительное время почти не меняются. Но таковы не все звезды. Есть звезды (и таких немало), которые по различным причинам меняют свой блеск. В одних случаях мы видим блеск звезд переменным, потому что они входят в состав уже знако-

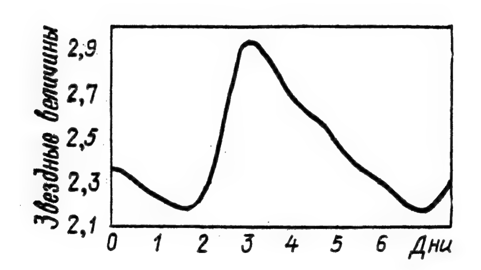


Рис. 9. Кривая блеска звезды δ Цефея.

мых нам затменно-двойных пар. В других случаях повторяющаяся переменность или резкие однократные изменения блеска отражают глубокие изменения, происходящие с самими звездами. Вот такие физические переменные и нестационарные по своей природе звезды нас и будут сейчас интересовать. Сразу же оговоримся: из большого числа нестационарных звезд мы наиболее подробно рассмотрим цефеиды и сверхновые звезды.

Цефеиды

Цефеиды — это физические переменные звезды, которым присущи особенности звезды δ Цефея. Чем же замечательна эта звезда? Рассмотрев кривую блеска δ Цефея (рис. 9), вы увидите, что блеск звезды непрерывно изменяется с периодом 5, 4 суток и амплитудой около 1^m. Блеск возрастает быстрее, чем ослабевает после максимума. Форма кривой все время в точности повторяется. Значит, δ Цефея — периодическая переменная звезда. Есть цефеиды с меньшими периодами (до нескольких часов) и бо́льшими (до нескольких десятков суток).

Между периодом пульсации и светимостью этих звезд существует зависимость, получившая название «период — светимость». Установлено, что, чем длиннее период (T), тем больше светимость (или абсолютная звездная величина):

$$M_{фот} = -0{,}35 - 2{,}08 \lg T, \qquad (27)$$

где $M_{фот}$ — абсолютная (фотографическая) звездная величина; T — период в сутках. Пользуясь этой полученной из наблюдений формулой, а также формулой (19), можно вычислить расстояние до цефеиды.

Каково расстояние до цефеиды, видимая звездная величина которой $+12^m$, а период колебаний блеска составляет примерно 4 сут?

Цефеиды видны с больших расстояний, так как они относятся к звездам-гигантам, а значит, имеют огромные светимости. Это позволяет обнаруживать цефеиды в далеких звездных системах, а затем определять расстояния до этих систем. Вот почему цефеиды (самые «важные» звезды) нередко называют «маяками Вселенной».

У цефеид изменяется не только блеск, но и лучевые скорости, измеряемые по смещению линий в спектре. Обратите внимание на сходство двух кривых, изображенных на рисунке 10,

Верхняя — кривая блеска, нижняя — кривая изменения лучевых скоростей (т. е. кривая, каждая точка которой показывает лучевую скорость в данный момент времени). Сравнение кривых показывает, что в максимуме блеска фотосфера звезды приближается к нам с наибольшей скоростью, а в минимуме — с наибольшей скоростью удаляется от нас.

Движение самой поверхности звезды, а значит, и изменение размеров и светимости звезды свидетельствуют о нестационарности цефеид. Цефеиды — это пульсирующие звезды, которые периодически раздуваются и сжимаются и у которых в процессе пульсации изменяется температура фотосферы. Рассматривая рисунок 10, нетрудно заметить, что в момент максимального блеска звезда имеет промежуточные размеры: она больше своих наименьших размеров, но меньше наибольших.

Звезды пульсируют в результате нарушения равновесия между силой тяжести и внутренним давлением. Эти нарушения возникают в протяженной оболочке звезды, где располагается богатый гелием слой, способный поглощать просачивающееся из недр звезды излучение. Возникают периодические изменения (пульсации), которые вызывают усиление и ослабление блеска звезды.

Существуют звезды, родственные цефеидам; например, сходны с цефеидами звезды типа *RR* Лиры. У большинства звезд этого типа период колебаний длится около 12 ч, но известны и такие, у которых период всего лишь немногим более одного часа. Звезды типа *RR* Лиры, как правило, переменные спектральных классов A — F, в отличие от цефеид, которые принадлежат к спектральным классам F6—G8.

Большинство цефеид расположено вблизи Млечного Пути, т. е. вблизи «плоскости Галактики». Про такие объекты говорят, что они входят в плоскую подсистему Галактики, содержащую наиболее «молодое население» Галактики. А вот звезды типа *RR* Лиры относятся к сферической подсистеме Галактики, так как нередко встречаются очень далеко от плоскости Галактики. Звезды типа *RR* Лиры обнаружены в шаровых звездных скоплениях, в которых находятся долгожители Галактики — самые старые звезды.

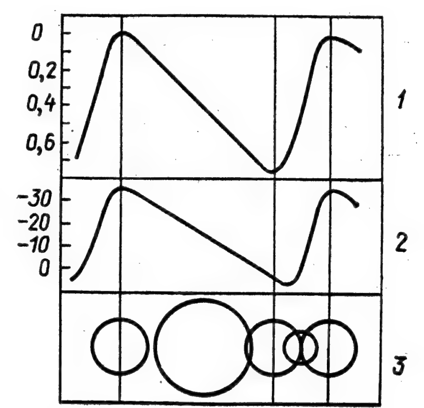


Рис. 10. Кривая блеска (*1*, по оси ординат дано изменение блеска), кривая лучевой скорости (*2*, по оси ординат даны лучевые скорости в км/с) и изменение размеров (*3*) звезды δ Цефея.

Другие физические переменные звезды

Цефеиды — это лишь один из многочисленных типов физических переменных звезд. Первая переменная звезда была открыта в 1596 г. в созвездии Кита. Она называется Мира Кита или «удивительная» Кита. Это не цефеида. Колебания ее блеска происходят с периодом около 350 суток, причем блеск в максимуме достигает $+2^m$, а в минимуме $+9^m$. Впоследствии было открыто много других долгопериодических звезд типа Миры Кита. Преимущественно это холодные звезды-гиганты спектрального класса М. Изменение блеска таких звезд, по-видимому, связано с пульсацией и периодическими извержениями горячих газов из недр звезды в более высокие слои атмосферы.

Далеко не у всех физических переменных звезд наблюдаются периодические изменения. Известно множество звезд, которые относятся к полуправильным или даже неправильным переменным. У таких звезд трудно или вообще невозможно заметить закономерность в изменении блеска.

В последние годы внимание астрономов привлекли красные карлики, блеск которых неожиданно возрастает в сотни, а иногда и в тысячи раз в течение минут или даже секунд. Такие звезды называются вспыхивающими. Оптические вспышки сопровождаются радиовспышками, которые значительно превосходят по масштабам хромосферные вспышки на Солнце, и сильным ультрафиолетовым излучением, которое имеет явно нетепловой характер и трудно объяснимо известными источниками энергии.

Новые и сверхновые звезды

Мы уже видели, что, в отличие от Солнца и других стационарных звезд, у физических переменных звезд изменяются размеры, температура поверхности, светимость. Среди различных видов нестационарных звезд особый интерес представляют новые и сверхновые звезды. В действительности же это не только что появившиеся звезды, а ранее существовавшие звезды, которые привлекли к себе внимание внезапным и исключительно большим возрастанием блеска. При вспышках новых звезд блеск увеличивается в тысячи и миллионы раз за время от нескольких суток до нескольких месяцев. Известны звезды, которые повторно вспыхивали как новые. Совокупность данных о новых звездах приводит к выводу, что это взрывающиеся звезды. Причины взрыва новых звезд пока еще неясны. Ясно лишь, что Солнце не относится к звездам, которые взрываются как новые. В последнее время стало известно, что новые входят в состав тесных двойных систем. Может быть, взаимодействие звезд, входящих в тесные пары, в некоторых случаях приводит к взрыву одной из них. Еще более грандиозны вспышки сверхновых, блеск которых внезапно возрастает примерно на 19^m!

Во сколько раз возрастает блеск звезд, вспыхивающих как сверхновые?

Вспышка сверхновой звезды характеризуется стремительным возрастанием блеска и светимости, а затем их медленным падением. В максимуме блеска в спектрах сверхновых линии сильно смещены к фиолетовому концу. Величина смещения спектральных линий соответствует приближению излучающей поверхности звезды к наблюдателю со скоростью в несколько тысяч километров в секунду. Картина вспышки сверхновых звезд свидетельствует о том, что сверхновые — это взрывающиеся звезды. При взрывах сверхновых в течение нескольких суток выделяется огромная энергия порядка 10^{48} эрг.

За сколько лет Солнце может излучить энергию, которая выделяется при вспышке сверхновой звезды?

В максимуме блеска одна сверхновая звезда может светить ярче миллиарда звезд, подобных нашему Солнцу. При наиболее мощных взрывах некоторых сверхновых звезд может выбрасываться со скоростью 5000—7000 км/с вещество, масса которого достигает нескольких солнечных масс. Остатки оболочек, сброшенных сверхновыми звездами, видны долгое время как расширяющиеся газовые туманности.

В самое последнее время удалось обнаружить не только остатки оболочек сверхновых звезд, но и то, что осталось от самой некогда взорвавшейся звезды. Такими «звездными остатками» оказались нейтронные звезды.

Вспышки сверхновых звезд относятся к очень редким явлениям. За последнее тысячелетие в нашей звездной системе наблюдалось всего лишь несколько вспышек сверхновых. Из них наиболее достоверно установлены следующие три: вспышка 1054 г. в созвездии Тельца; в 1572 г. в созвездии Кассиопеи; в 1604 г. в созвездии Змееносца. Первая из этих сверхновых описана как «звезда-гостья» китайскими и японскими астрономами, вторая — Тихо Браге, а третью наблюдал Иоганн Кеплер. Блеск сверхновых 1054 и 1572 гг. превосходил блеск Венеры, и эти звезды были видны днем. Со времени изобретения телескопа (1609 г.) в нашей звездной системе не наблюдалось ни одной сверхновой звезды. Но благодаря развитию телескопической астрономии появилась возможность исследовать другие звездные системы и, в частности, открывать в них новые и сверхновые звезды.

Вспышки сверхновых относятся к одному из самых грандиозных явлений, происходящих сейчас во Вселенной, уступая, пожалуй, лишь загадочным процессам в ядрах галактик и квазаров (об этом мы расскажем ниже). Исследование процессов, вызывающих и сопровождающих вспышки сверхновых, может иметь существенное значение для современных представлений о происхождении и развитии звезд, о синтезе химических элементов (поскольку элементы тяжелее водорода образуются в звездах в ходе ядерных реакций), о происхождении космических лучей и о многих других важных процессах во Вселенной.

НАША ГАЛАКТИКА

Строение Галактики

Благодаря современным оптическим и радиоастрономическим наблюдениям мы, находясь внутри Галактики, можем не только подробно исследовать ее близлежащие области, но и получить представление о всей галактической системе.

По форме наиболее яркая часть Галактики напоминает огромный диск (диаметр около 30 000 пс) с утолщением в центре (рис. 11).

Сколько времени потребуется свету, чтобы пересечь Галактику?

Галактический «диск» не имеет резких границ. Звезды, относящиеся к нашей Галактике, встречаются и за его пределами. По мере приближения к плоскости симметрии Галактики количество звезд в единице объема (или пространственная звездная плотность) возрастает. Звездная плотность увеличивается также и по мере приближения к центральной области Галактики.

Различные типы звезд отличаются не только своими физическими характеристиками, но, как уже говорилось, и расположением в Галактике. То же относится и к другим объектам, входящим в состав Галактики. Рассеянные звездные скопления и диффузные туманности располагаются вблизи галактической плоскости, а шаровые скопления заполняют сферический объем, частично проникая в диск.

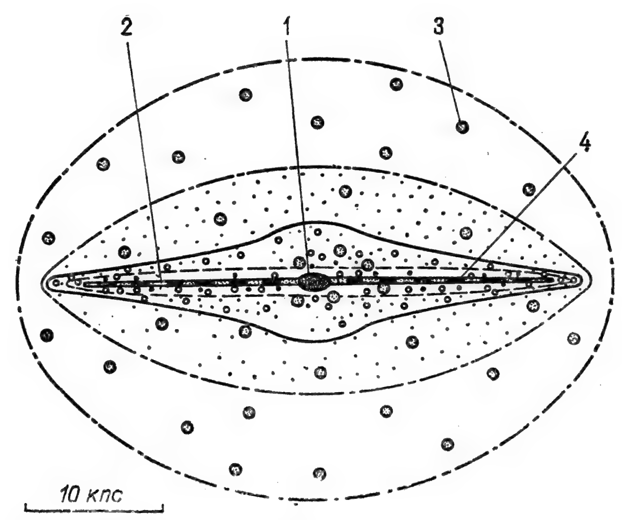


Рис. 11. Строение Галактики: *1* — ядро; *2* — место Солнца в Галактике; *3* — шаровое звездное скопление; *4* — галактическая «плоскость».

Если бы мы могли взглянуть на галактический диск сверху, то обнаружили бы огромные ветви или спиральные рукава, в состав которых входят звезды, пыль и газ. Спирали Галактики выходят из находящегося в ее центре ядра. Ядро расположено в направлении созвездия Стрельца. Но просто увидеть его в телескоп нельзя, так как оно скрыто от нас облаками космической пыли. Ядро Галактики сфотографировали в середине нынешнего века в инфракрасных лучах, которые слабее поглощаются пылевыми облаками. Тщательно исследуется и радиоизлучение ядра. Все это позволило узнать размеры ядра: его диаметр составляет 1300 пс.

Солнце находится от центра Галактики на расстоянии не менее 8000—10 000 пс и расположено почти в плоскости Галактики. Таким образом, Солнце не только не является центром Вселенной, но и достаточно удалено от центра Галактики. Галактика вращается. Наше Солнце как раз находится на том расстоянии от центра Галактики, где линейная скорость звезд максимальна. Солнце и ближайшие к нему звезды движутся вокруг центра Галактики со скоростью около 250 км/с, совершая полный оборот примерно за 200 млн. лет.

Сравните следующие скорости космических движений: скорость движения Земли вокруг Солнца, скорость движения Солнца относительно ближайших звезд и скорость движения Солнца вокруг центра Галактики.

Звезд, массы которых близки к массе Солнца, в Галактике не менее 150 миллиардов. Общее же число звезд Галактики, включая звезды с существенно меньшей массой, составляет, возможно, $2 \cdot 10^{12}$ (два триллиона!).

Еще недавно называли Галактику просто «наша звездная система». Однако в дальнейшем выяснилось, что звезды составляют лишь остов гигантской системы. Следовательно, Галактика — это сложнейшая совокупность звезд (с обращающимися вокруг них планетами), звездных скоплений, полей, диффузной межзвездной материи, космических лучей. Материя в Галактике встречается в двух основных видах. Это, во-первых, вещество (преимущественно плазма, из которой состоят звезды и межзвездный газ, и твердая фаза, присущая, по-видимому, большинству планет и космической пыли). Во-вторых, это поля (электромагнитное, гравитационное, магнитное).

Космические лучи и магнитное поле Галактики

В отличие от видимого света, ультрафиолетовых лучей и других видов электромагнитных излучений, космические лучи — это потоки быстрых заряженных частиц (протонов, ядер различных элементов, электронов). Отличительная черта космических лучей — огромная энергия, которой они обладают. Например, в космических лучах встречаются частицы, энергия которых достигает 10^{20} эВ. В земных условиях невозможно получить частицы столь больших энергий. Крупнейший в мире

ускоритель элементарных частиц, построенный в Серпухове советскими инженерами и учеными, сообщает частицам энергии до $7 \cdot 10^{10}$ эВ. Не удивительно, что многие свойства элементарных частиц были выяснены при изучении космических лучей еще до появления ускорителей.

Всего лишь несколько лет назад при описании строения Галактики редко упоминались космические лучи. Но сейчас выяснилось, что космические лучи наряду со звездами, планетами и диффузной материей являются важной составной частью Галактики. Возникла новая область астрофизики — «астрофизика космических лучей» (ставшая впоследствии частью «астрофизики высоких энергий»). В нашей стране она получила развитие в работах академика В. Л. Гинзбурга.

Космические лучи могут возникать в результате многочисленных процессов, происходящих в Солнечной системе, в Галактике и за пределами Галактики. Точно указать, где именно образовались космические лучи, возникшие за пределами Солнечной системы, невозможно, так как они приходят к Земле равномерно со всех направлений. Бесспорно, некоторое количество космических лучей образуется во время хромосферных вспышек. Но это примерно 1% космических лучей, достигающих Земли. Основное количество космических лучей в нашей Галактике скорее всего возникает при взрывах сверхновых звезд.

Космические лучи обычно не покидают Галактику, так как удерживаются существующими в ней магнитными полями. Поля эти очень слабы (их напряженность порядка 10^{-5}—10^{-6} э). Однако они отличаются большой протяженностью и сложной, запутанной картиной расположения магнитных силовых линий. При движении в магнитных полях частицы космических лучей, имеющие значительную начальную энергию, разгоняются до скоростей, близких к c, и приобретают огромные энергии.

До поверхности Земли первичные космические лучи не доходят, так как им приходится вступать в многократные взаимодействия с частицами, из которых состоит атмосфера Земли. Поэтому аппаратура для исследования космических лучей устанавливается на высоких горах, поднимается на стратостатах, искусственных спутниках Земли и космических ракетах.

С космическими лучами связано радиоизлучение Галактики, ими обусловлен нагрев межзвездного газа и многие другие процессы, происходящие в пространстве между звездами.

Радиоизлучение Галактики

В начале 30-х годов при изучении шумов, мешавших радиосвязи, было обращено внимание на устойчивый свистяще-шипящий звук, отличавшийся от треска грозовых разрядов. Выяснилось, что источник необычных радиопомех имеет внеземное происхождение и находится в направлении центра Галактики. Дальнейшие наблюдения с радиотелескопами, настроенными на

разные длины волн, показали, что радиоизлучение приходит к нам со всех участков неба.

Человек не ощущает радиоизлучения. Но если бы мы могли «видеть» радиоизлучение, то обнаружили бы, что светится все небо: это слабое излучение в сантиметровом диапазоне и ослепительно яркое в диапазоне метровых волн.

Что порождает этот непрерывный фон космического радиоизлучения? Мы знаем, что Солнце излучает в пространство радиоволны. Другие звезды также являются источниками космического радиоизлучения, но пока обнаружено радиоизлучение лишь от некоторых звезд, например от пульсаров. В оптическом диапазоне свет Солнца почти в 100 млрд. раз ярче света всех звезд вместе взятых. В радиодиапазоне, наоборот, интенсивность космического излучения в тысячи раз превосходит радиоизлучение Солнца в годы максимума солнечной активности. Из всего этого можно заключить, что свечение «радионеба» обусловлено не звездами. Его источник — межзвездная среда.

Радиоизлучение межзвездной среды вызвано рядом причин. Во-первых, радиоволны излучают ионизованный горячий газ, нагретый до 10 000 К. Нагрев и ионизацию газа (преимущественно водорода) вызывают горячие звезды и космические лучи. Это тепловое радиоизлучение. Во-вторых, источник радиоизлучения на волне 21 см — нейтральный водород, которого в межзвездном пространстве значительно больше, чем ионизованного. Исследование радиоизлучения Галактики непрерывно пополняет наши сведения о ней. Так, например, исследование на волне 21 см распределения нейтрального водорода помогает выявить расположение спиральных ветвей. Именно в спиралях Галактики сосредоточено особенно много межзвездного газа. Наблюдения на волне 21 см доказывают, что газ, как и звезды, участвует во вращении Галактики.

В-третьих, радиоволны излучают релятивистские электроны, входящие в состав космических лучей. Эти электроны, закручиваясь магнитными полями Галактики, движутся ускоренно, излучая электромагнитные волны (в метровом диапазоне). Такое нетепловое радиоизлучение называется синхротронным (магнитотормозным).

Представим себе нерелятивистский электрон, движущийся в однородном магнитном поле. Такой электрон будет двигаться по винтовой линии, охватывающей магнитные силовые линии. Угловая частота пропорциональна напряженности магнитного поля, и с этой частотой электрон излучает подобно диполю. Такое излучение не имеет избранного направления — оно изотропно. Иная картина наблюдается при движении в магнитном поле релятивистского электрона. Его излучение сосредоточено в узком пучке в пределах конуса, мгновенная ось которого направлена вдоль вектора скорости электрона. Расположившись в плоскости орбиты релятивистского электрона, наблюдатель

будет регистрировать импульсы излучения, длящиеся пока конус излучения проходит через наблюдателя. Излучая непрерывный спектр, электрон теряет свою энергию. Характерная особенность магнитотормозного излучения космических электронов — поляризация, наблюдаемая в радио- и оптическом диапазонах. Ее направление определяется направлением магнитного поля, в котором движется электрон. Обнаружение поляризации в излучении какого-либо космического объекта рассматривается как доказательство, что его излучение порождено тормозным излучением и что в хаотическом распределении магнитных полей есть какое-то «избранное» направление.

Классический пример объекта, излучение которого интерпретируется как магнитотормозное излучение релятивистских электронов — Крабовидная туманность (или просто «Краб»), доставшаяся нам в наследство от сверхновой, вспыхнувшей в созвездии Тельца в 1054 г. В обосновании этой замечательной интерпретации, позволяющей с единой точки зрения объяснить излучение Крабовидной туманности во всех диапазонах длин волн, особая заслуга принадлежит И. С. Шкловскому. Синхротронным механизмом, подробно исследованным академиком В. Л. Гинзбургом и членом-корреспондентом АН СССР И. С. Шкловским, объясняется радиоизлучение и других отдельных (или дискретных) галактических объектов.

УДИВИТЕЛЬНЫЕ ПУЛЬСАРЫ

История открытия

Открытие пульсаров, оказавшихся членами нашей Галактики, было неожиданным и знаменательным в истории новейшей астрофизики. Их не искали, как ищут кварки, монополи или гравитационные волны. Их не искали, потому что не подозревали об их существовании (хотя то, чем оказались пульсары, было предметом неутомимых поисков!). Их открыли не увидев. Их «услышали», причем не сразу поверили тому, что услышали.

А произошло это летом 1967 г., когда во время испытания нового радиотелескопа в Кембридже (Англия) аспирантка профессора А. Хьюиша мисс Ж. Белл обнаружила слабый радиосигнал, приходивший из определенной части неба, повторявшийся регулярно каждые 1,33... с и длившийся несколько сотых секунды. Время от времени источник переставал работать, а потом «возвращался» и как ни в чем не бывало продолжал посылать свои странные импульсы. Самым первым пульсарам вначале присвоили обозначения *LGM*1, 2, 3 и 4, не на шутку решив, что открыты внеземные цивилизации с существами «зелеными человечками» (*LGM* — little green men — маленькие зеленые человечки)...

Англичане проявили большую выдержку, терпение и осторожность: первый пульсар был открыт в августе 1967 г., в

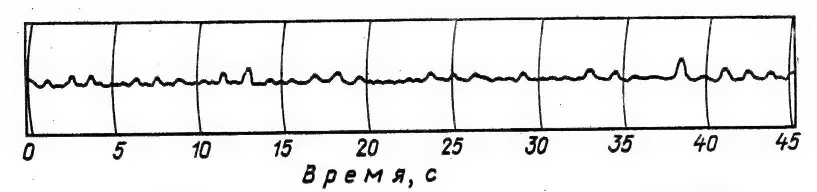


Рис. 12. Одна из ранних записей радиоизлучения СР 1919.

ноябре 1967 г. ученые убедились, что источник имеет космическое происхождение, но лишь 28 февраля 1968 г., т. е. почти через полгода после получения первых данных, открытие было обнародовано. Сразу же ученые разных стран и континентов, мгновенно оценив важность нового открытия, приступили к наблюдению этих объектов, названных пульсарами (от слова «pulse» — импульс, импульсное излучение). На участки неба, откуда доносились голоса пульсаров, были направлены самые мощные оптические телескопы. Все это принесло немалые плоды: к середине 70-х годов открыто более 150 пульсаров, а главное — найден путь к пониманию их природы.

Данные радионаблюдений

Радиоимпульсы от пульсаров повторяются с периодом от 0,033 до 5 с. У первого из обнаруженных пульсаров СР 1919 (Кембриджский пульсар с прямым восхождением $19^ч 19^м$) период составляет 1,33730113 с (рис. 12).

Зная прямое восхождение и склонение пульсара СР 1919 ($\delta=+22°$), найдите его положение на звездной карте и определите, в каком созвездии он находится.

Импульсы имеют сложную форму, причем от импульса к импульсу несколько меняется их форма и амплитуда. С течением времени очень медленно растет период следования импульсов. Быстрее всего он возрастает у пульсара в Крабовидной туманности. Это, как мы увидим дальше, замечательный пульсар. Его наиболее распространенное обозначение *NP* 0532 (пульсар, открытый в Национальной радиоастрономической обсерватории Грин Бэнк, США).

NP 0532 обладает самым коротким периодом (0,033 с) и самым быстрым увеличением периода: период удваивается всего лишь... за 1000 лет (известны пульсары, удвоение периода которых происходит за десятки и сотни миллионов лет).

Наблюдения пульсаров производились на разных волнах. При этом обнаружилось, что, чем длиннее волны, тем позднее наблюдается импульс. Такое явление связано с распространением «волнового пакета» в межзвездной среде. Сигналы радиоизлучения с разными несущими частотами распространяются там с различной скоростью: высокочастотные импульсы обгоняют низкочастотные, которые за столетия бега опаздывают... всего на

несколько секунд, редко — минут. Мы благодарны этим опоздавшим: им (больше, чем высокочастотным колебаниям) мешала межзвездная плазма. Узнав величину запаздывания, астрономы оценивают полное число свободных электронов, расположенных вдоль луча зрения. Это очень важная величина, так как, зная ее и среднюю концентрацию электронов в межзвездной среде (близкую к 0,1 $см^{-3}$), можно оценить расстояния до пульсаров. Они составляют сотни и даже тысячи парсек.

Объясните, почему на этом основании пульсары относят к галактическим объектам.

Вскоре после открытия пульсаров было обнаружено, что их излучение поляризовано, т. е. радиоизлучение преимущественно распространяется в определенной плоскости. Когда поляризованное радиоизлучение распространяется в магнитном поле, то плоскость поляризации поворачивается, причем тем больше, чем больше напряженность магнитного поля («эффект Фарадея»). Через какие магнитные поля приходится проходить излучению пульсаров? Во-первых, через межзвездное магнитное поле (магнитное поле Галактики) и, во-вторых, через магнитное поле Земли. Напряженность магнитного поля Земли не превышает 1 э. Если учесть это, то можно узнать, какое магнитное поле вызывает добавочный поворот плоскости поляризации. Отсюда и получается оценка напряженности магнитного поля Галактики (порядка 10^{-5} э).

Так, еще ничего не зная о природе пульсаров, астрономы сумели с их помощью получить независимо от других методов информацию о физических свойствах межзвездной среды.

Отождествление

Используя радиоинтерферометры (см. с. 72), т. е. систему, состоящую из разнесенных на некоторое расстояние и связанных друг с другом антенн, ученые довольно точно определили положение пульсаров на небе. Когда по координатам нанесли точки на карту, то оказалось, что пульсары на небе расположены не хаотично, а явно концентрируются к галактической плоскости (т. е. к плоскости Млечного Пути). Это еще одно свидетельство принадлежности пульсаров к нашей Галактике.

Зафиксировав положение нескольких пульсаров, астрономы попытались отождествить их с какими-нибудь оптическими объектами. С этой целью изучались фотографии, полученные с крупнейшими оптическими телескопами. Но ничего обнаружить не удалось: в указанных радиоастрономами участках неба никаких оптических объектов, включая белые карлики, не было. Странная создалась ситуация: астрономы слышали «голоса» пульсаров, знали, где пульсары должны находиться на небе, ухитрились даже определить расстояние до пульсаров, но самих пульсаров никто не видел. Все это немножко напоминает одно

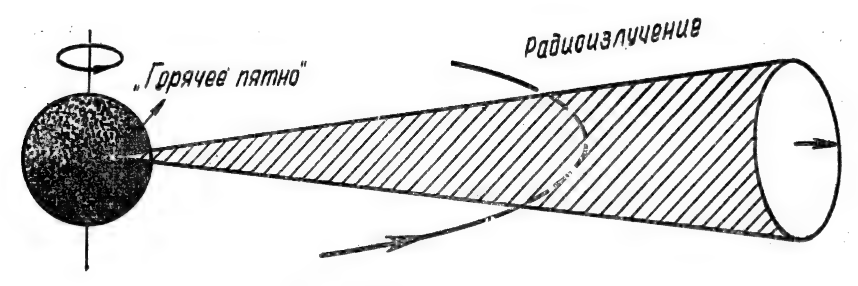


Рис. 13. Модель «маяка».

из приключений Алисы в стране чудес, где девочка увидела только улыбку исчезнувшего Чеширского кота...

Почти два года пульсары оставались таинственными невидимками. Положение изменилось в конце 1969 г., когда выяснилось, что в центре и без того знаменитой Крабовидной туманности находится пульсар, излучающий не только в обычном для пульсаров диапазоне радиочастот, но и в оптическом, и рентгеновском диапазонах. Напомним, что Крабовидная туманность, отстоящая от нас на расстоянии 6000 световых лет, представляет собой расширяющуюся со скоростью свыше 1400 км/с оболочку сверхновой звезды, вспыхнувшей 920 лет назад[1]. Это неисчерпаемый источник многочисленных астрофизических открытий последних десятилетий. Крабовидная туманность излучает в радио-, оптическом, рентгеновском и, возможно, гамма-диапазонах. И вот в такой замечательной туманности был открыт пульсар, который оказался уникальным пульсаром. Рентгеновское излучение пульсара в Крабе не просто добавок к другим видам излучения, а один из основных видов излучения пульсара. В рентгеновском диапазоне пульсар излучает энергии в сотни раз больше, чем в оптическом, а в оптическом — в сотни раз больше, чем в радиодиапазоне.

Пульсар в Крабовидной туманности был отождествлен со слабой звездочкой почти 17^m, которая расположена в центре Крабовидной туманности. Еще несколько десятилетий назад высказывались предположения, что эта звезда представляет остаток сверхновой, вспышка которой породила Крабовидную туманность.

Вычислите абсолютную звездную величину этой звезды, зная, что она находится от нас на расстоянии 2000 пс и межзвездное поглощение ослабляет ее блеск примерно на 2^m. Какова светимость звезды в оптическом диапазоне?

Пульсары и нейтронные звезды

Тщательный анализ данных наблюдений привел ученых к выводу о том, что пульсары — это быстровращающиеся

[1] Не нужно забывать, что в этом и подобных случаях речь идет об очень далеком от нас явлении. И то, что было замечено на Земле 920 лет назад, произошло, очевидно, на 6000 лет раньше!

звезды, которые испускают направленный пучок радиоволн (рис. 13). Считается, что ось вращения звезды не совпадает с магнитной осью. Поэтому в самом общем виде модель пульсара — «наклонный ротатор» с имеющейся на нем какой-то активной областью радиоизлучения. Такой ротатор подобен маяку: наблюдатель фиксирует импульс радиоизлучения, когда на него направлен узкий пучок радиоволн, а это повторяется всякий раз после того, как звезда сделает оборот вокруг своей оси. Значит, период пульсаров равен периоду вращения «маяка».

Какую линейную скорость приобрело бы вещество фотосферы Солнца, если бы наше светило вдруг начало вращаться с периодом, равным периоду пульсара в Крабе? Что случилось бы в этом случае с Солнцем или подобной ему звездой? Существенно ли изменилась бы ситуация в случае белого карлика?

Выполнив расчеты, необходимые для решения приведенной выше задачи, вы убедитесь, что в роли пульсара невозможно представить себе ни один из известных нам типов звезд. Чтобы линейная скорость вращения на экваторе звезды была существенно меньше скорости света, необходимы крошечные звезды, радиусы которых около 10 км! Но так как массы и таких «нейтронных звезд» мало отличаются от массы Солнца, то плотность вещества звезды будет близка к плотности атомного ядра.

Вычислите плотность нейтронной звезды. Сравните ее со средней плотностью Солнца и Земли. Сколько весила бы на Земле чайная ложка, наполненная веществом нейтронной звезды?

Существование звезд столь чудовищной плотности (в недрах нейтронных звезд плотность достигает 1 млрд. тонн в 1 $см^3$!) было предсказано еще в 30-х годах астрономами-наблюдателями и физиками-теоретиками. Среди последних особое место принадлежит замечательному советскому физику академику Л. Д. Ландау (1908—1968). Любопытно, что тогда же в качестве возможного «кандидата» в нейтронные звезды астрономы называли звезду в Крабе, но на эту гипотезу никто не обратил серьезного внимания... Однако о возможном существовании нейтронных звезд не забыли. Более того, их непрерывно искали, неоднократно астрономам казалось, что они нашли, по выражению И. С. Шкловского, «синюю птицу», но затем наступало разочарование, так как нейтронные звезды не удавалось обнаружить. И вот, наконец, нейтронные звезды предстали в облике, который никто предугадать не мог, в облике пульсаров. Нам предстоит убедиться в том, что открытие нейтронных звезд — не только пример триумфа радиоастрономии и теории звездной эволюции, но и теоретической физики. В самом деле, нейтронные звезды представляют собой ту самую конфигурацию, на которой может остановиться сжатие звезды с массой $1{,}2M_{\odot} < M < 2M_{\odot}$. Такие звезды, не довольствуясь стадией белых карликов, продолжают сжиматься. Но вот, наконец, сжатие прекратилось. Каковы свойства образовавшейся нейтронной звезды?

Два из них нам известны: нейтронные звезды — крохотные звезды, сравнимые по размерам с небольшими астероидами; нейтронные звезды — это звезды, плотность которых в сотни миллионов раз превышает плотность белых карликов. Нетрудно также понять, что нейтронная звезда должна очень быстро вращаться вокруг своей оси, так как она образовалась из большой и медленно вращавшейся звезды. Достаточно вспомнить, как быстро начинает вращаться фигурист, резко прижавший широко разведенные руки.

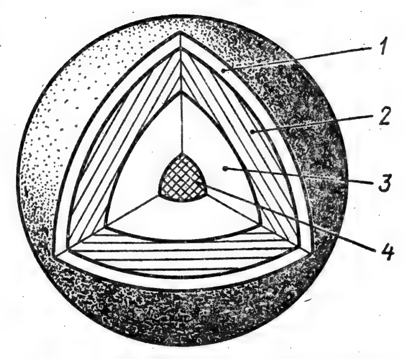


Рис. 14. Строение нейтронной звезды: *1* — плотная плазменная оболочка; *2* — твердая кора; *3* — сверхтекучая и сверхпроводящая «жидкость»; *4* — ядро (масштаб не выдержан).

Большинство обычных звезд обладает незначительным общим магнитным полем. Например, у нашего Солнца оно не превосходит 1 э. Иное дело — нейтронная звезда, напряженность поля которой порядка 10^{12} э. Такое громадное магнитное поле — результат сжатия звезды, уменьшения ее поверхности и сгущения силовых линий, количество которых при сжатии звезды сохраняется.

У нейтронной звезды не только колоссальное магнитное поле, но и гравитационное поле.

Вычислите ускорение силы тяжести на поверхности нейтронной звезды.

Теперь перейдем к рассмотрению строения нейтронной звезды (рис. 14). Оно поистине удивительно. В целом нейтронная звезда подобна гигантскому ядру атома, перенасыщенному нейтронами. От ядра атома нейтронную звезду отличают не только размеры, но и то, что протоны и нейтроны удерживаются в ней в основном гравитационными, а не внутриядерными силами. При температуре порядка миллиона градусов нейтронная звезда обладает... твердой корой, прочность которой во много раз превышает прочность стали при самых высоких давлениях. Этот диковинный вывод следует из расчета, согласно которому температура плавления электронно-ядерной плазмы с плотностью более 10^{10} г/см^3 (в ней электронный газ вырожден, а ядра устойчивы) раз в 100 выше, чем температура поверхностного слоя нейтронной звезды. Если дальнейшие исследования подтвердят все это, то кора нейтронной звезды будет уникальным примером такой сверхнеобычной кристаллизации вещества.

Но это еще не все — в центре нейтронной звезды — загадочное ядро, в котором при плотности 10^{15} г/см^3 и температуре порядка миллиарда градусов (!) находятся не только нуклоны

и электроны, но и мезоны и гипероны. Между корой и ядром расположена мантия, состоящая из сверхтекучей нейтронной жидкости и сверхпроводящей протонной. Оказывается, что условия, господствующие в нейтронной звезде, благоприятны для возникновения у вещества таких квантовомеханических свойств, которые в земных условиях наблюдаются у жидкого гелия вблизи абсолютного нуля! После сказанного вам, наверное, будут понятны оценки, которые дают пульсарам крупные физики-теоретики.

Профессор Ф. Дайсон (США): «Самую волнующую часть физики в настоящий момент следует искать на границе физики с астрономией, где мы натолкнулись на удачу, которая редко нисходит к людям,— открыли пульсары. Пульсары оказались такой лабораторией, в которой можно изучать свойства вещества в условиях, в миллион раз более экстремальных, чем те, которые до сих пор были нам доступны, уникальной лабораторией, где будет возможна проверка физических теорий, перекрывающих многие разделы физики — от сверхтекучести до общей теории относительности».

Академик В. Л. Гинзбург (СССР): «Пульсары находятся не только в фокусе астрономии сегодняшнего дня, но, по всей вероятности, останутся в центре внимания еще многие годы и даже десятилетия».

Интересно отметить, что радиоастроном А. Хьюиш, открывший пульсары, был удостоен Нобелевской премии по физике (!) за 1974 г.

«Модели» механизма радиоизлучения

Но почему же все-таки вращающиеся нейтронные звезды являются пульсарами? Чем объясняется странный характер их излучения?

Как и обычные звезды, нейтронные звезды остывают, теряя энергию при излучении в пространство электромагнитных волн.

Значительные потери энергии связаны у пульсаров с испусканием нейтрино. В недрах нейтронной звезды нейтрино могут возникать при различных процессах распада и взаимодействия элементарных частиц. Однако ни излучение с поверхности нейтронной звезды, ни потери энергии, идущие непосредственно из недр звезды, не могут вызвать «пульсарных» эффектов. Они и не были предсказаны: до открытия нейтронных звезд никто не знал, что они могут проявлять себя как пульсирующие радиоисточники.

Вот и приходится искать какой-то особый механизм излучения (в частности, радиоизлучения пульсаров), с помощью которого в виде радиоволн излучается энергия стремительно вращающейся в магнитном поле нейтронной звезды. Прежде всего выясняется, что радиоизлучение пульсаров должно иметь нетепловой характер, потому что в противном случае пришлось

бы допустить, что поверхность нейтронной звезды нагрета не до 10^6 К, а до 10^{30} К! Наиболее естественно связать радиоизлучение пульсаров с явлениями в плазме, окружающей нейтронную звезду.

Согласно одной из гипотез, пульсары излучают подобно мазерам, которые (в отличие от лазеров) излучают в радиодиапазоне. Считается, что радиоизлучение возникает в плазменной магнитосфере пульсаров с плотностью 10^7—10^{12} частиц в 1 $см^3$. В магнитосферу нейтронная звезда постоянно выбрасывает быстрые электроны. Эти электроны возбуждают в плазме колебания, а последние — электромагнитные волны, усиливающиеся во время прохождения через магнитосферу звезды. Так может возникнуть направленное электромагнитное излучение в радиодиапазоне. Заметим, что с мазерными эффектами астрофизики встречались и до открытия пульсаров, изучая механизм всплесков радиоизлучения Солнца и излучение облаков межзвездного газа.

Дальнейшие исследования внесут ясность в механизм излучения пульсаров. Однако уже сейчас можно указать, откуда черпается энергия излучения, в тысячи раз превышающая энергию, излучаемую Солнцем. Ее источник — вращение нейтронной звезды. Пульсации нейтронной звезды связаны с быстрым вращением и с большим магнитным полем, при вращении которого индуцируется переменное электрическое поле (напряженностью порядка 10^{11} В/см), непрерывно срывающее с поверхности звезды частицы. Эти частицы и выбрасываются в магнитосферу звезды. Излучение частиц должно происходить вдоль магнитной оси нейтронной звезды. Поэтому мы можем «видеть» лишь те пульсары, у которых эта ось близка к лучу зрения и луч «маяка» «задевает» Землю.

Мы знаем, что периоды пульсаров растут, т. е. вращение нейтронных звезд замедляется. Освободившуюся энергию наклонный ротатор расходует на выброс частиц, радиоизлучение и, если у пульсара есть туманность, на излучение этой туманности. Направленность радиоизлучения — один из эффектов, вызванных тем, что вращающаяся нейтронная звезда обладает гигантскими магнитными полями. «Скачки» периодов пульсаров могут быть связаны со «звездотрясениями», которые вызываются тем, что твердая кора нейтронной звезды должна временами растрескиваться. Почему? Да потому хотя бы, что остывающая кора не способна в отличие от жидкой «начинки» нейтронной звезды эластично менять свою форму. Кроме того, не исключено, что может измениться угловая скорость вращения жидкой части нейтронной звезды. Тогда, естественно, изменится и та фигура вращения, которую приобрела жидкость в результате вращения. Кора, однажды «приспособившись» к этой фигуре и повторив ее, не может столь оперативно, как жидкость, изменять свою форму. Такова вторая возможная причина «звездотрясений».

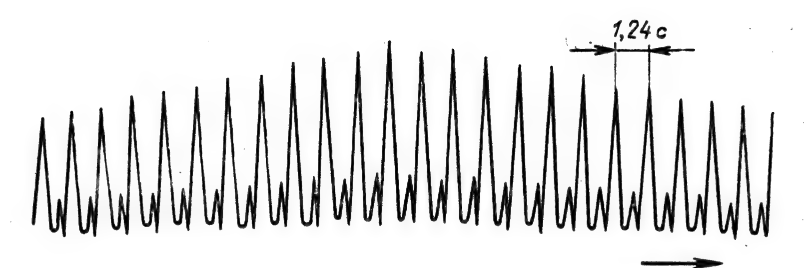


Рис. 15. Рентгеновское излучение от источника Геркулес X-1.

Рентгеновские пульсары

Большинство пульсаров излучает только в радиодиапазоне. Уникальный пульсар в Крабовидной туманности — источник радио-, оптического, рентгеновского и, возможно, гамма-излучения. Но есть пульсары, которые проявляют себя только в рентгеновском диапазоне. Это рентгеновские пульсары. Они были обнаружены в результате наблюдения неба с помощью аппаратуры («рентгеновских телескопов»), установленной на искусственных спутниках Земли и орбитальных станциях, например на советской научной станции «Салют-4».

Наиболее подробно удалось изучить рентгеновский пульсар, находящийся в созвездии Геркулеса (рис. 15). Он называется Геркулес X-1 и имеет период 1,24 с, соответствующий периоду вращения нейтронной звезды. Однако, кроме этого периода, обнаружен и ряд других. Например, после 1,7 суток наблюдения источник «отключается» примерно на 6 ч. Такое поведение пульсара легче всего объяснить тем, что нейтронная звезда входит в состав затменной двойной звезды и обращается вокруг обычной звезды. Тогда 1,7 сут — период обращения нейтронной звезды, а 6 ч — длительность затмения, при котором обычная звезда заслоняет от нас нейтронную.

Обычную звезду удалось обнаружить на небе. Ею оказалась неправильная переменная звезда, у которой за 1,7 суток происходит полный цикл изменения блеска, причем в максимуме звезда $13^m,2$, а в минимуме $14^m,8$. По мнению советских астрофизиков, такая переменность блеска может быть вызвана «подогревающим» действием рентгеновского излучения нейтронной звезды.

Какова природа рентгеновского излучения пульсаров? Ученые полагают, что оно возникает при падении на нейтронную звезду вещества, истекающего с поверхности обычной звезды. Энергия падающего вещества превращается в тепловую, вещество разогревается до миллионов градусов и начинает излучать энергию в рентгеновском диапазоне. Если магнитная ось нейтронной звезды не совпадает с осью вращения, то «горячие пятна», возникшие в области магнитных полюсов, будут посылать рент-

геновское излучение в сторону земного наблюдателя. Такое излучение, как и в случае радиопульсаров, будет пульсирующим (с периодом, равным периоду вращения нейтронной звезды). Падающее на нейтронную звезду вещество препятствует выбросу из нее частиц, необходимых для появления радиоизлучения. Поэтому рентгеновские пульсары «не работают» в радиодиапазоне. Нарисованная картина должна получить подтверждение в ходе дальнейших наблюдений и теоретических исследований.

ДРУГИЕ ГАЛАКТИКИ

В настоящее время хорошо известно, что существует множество других галактик, каждая из которых, подобно нашей, состоит из миллиардов звезд. Огромные расстояния, отделяющие Солнечную систему от этих миров, почти лишают нас возможности видеть их невооруженным глазом. Зато телескоп раскрывает перед человеком поистине глубины Вселенной: крупнейшим современным телескопам доступна область Вселенной, в которой находятся миллиарды галактик. Их исследованием занимается внегалактическая астрономия. Подобно физике элементарных частиц, проникающей в тайны невидимого микромира, внегалактическая астрономия изучает разнообразные, очень далекие от нас космические объекты безграничного мегамира, непрерывно расширяя и уточняя наши представления о Вселенной.

Многообразие галактик

Мир галактик поражает своим разнообразием. Галактики отличаются размерами, числом входящих в них звезд, светимостями, внешним видом.

Галактики обозначаются номерами, под которыми они внесены в каталоги. Например, М31, М82 (Каталог Мессье) или NGC224, NGC3032 («Новый общий каталог» — «New general Catalogue», сокращенно: NGC).

По внешнему виду галактики условно разделены на три основных типа: эллиптические, спиральные и неправильные. Пространственная форма эллиптических галактик — эллипсоиды с разной степенью сжатия. Сжатие эллиптических галактик свидетельствует об их вращении. Среди эллиптических галактик встречаются гигантские и карликовые. Почти шаровую форму имеет самая массивная из галактик с измеренной массой NGC4486. Ее масса не меньше чем в 10 раз, превышает массу нашей Галактики и составляет примерно 1000 млрд. масс Солнца. NGC4486 окружена системой шаровых скоплений, которых насчитывается более 400.

Спиральные галактики имеют ветви, обычно выходящие из центрального ядра. Это самый многочисленный тип галактик.

К нему относятся наша Галактика и гигантская Туманность Андромеды (M31 или NGC224), удаленная от нас примерно на 2 млн. световых лет. Это одна из немногих галактик, видимых невооруженным глазом. Размеры NGC224 в 1,5—2 раза превосходят размеры нашей Галактики. По спектру можно обнаружить вращение некоторых спиральных галактик и определить скорость вращения. Исследование вращения каждой галактики позволяет получить представление о распределении вещества в ней и оценить массу галактики.

Неправильные галактики не имеют центральных ядер и не обнаруживают закономерностей в своем строении. Жители южного полушария Земли могут невооруженным глазом видеть две неправильные галактики — Большое и Малое Магеллановы Облака. Это самые крупные спутники нашей Галактики. Они находятся сравнительно недалеко от нас, на расстоянии всего лишь в полтора раза большем диаметра Галактики. Магеллановы Облака значительно меньше нашей Галактики по массе и размерам. Изучение Магеллановых Облаков позволяет получить ценнейшие сведения о звездах, звездных скоплениях и диффузной материи.

Нередко встречаются и другие виды галактик, которые по своим свойствам отличаются от эллиптических, спиральных и неправильных. Таковы, например, взаимодействующие галактики, подробно исследованные советским астрономом профессором Б. А. Воронцовым-Вельяминовым.

«Скрытая» масса в галактиках

В последнее время астрономы большое внимание уделяют проблеме невидимого вещества, входящего в состав галактик. Считается, что в периферийных областях галактик может быть сосредоточено немало вещества, наличие которого не учитывалось в прежних вычислениях масс галактик. Советские астрономы, работающие в Тартуской обсерватории, допускают, что галактики окружены очень массивными и протяженными «коронами». По их данным, «корона» нашей Галактики имеет массу около $10^{12}M_\odot$, а «короны» гигантских эллиптических галактик в 10—30 раз больше. Внешний радиус «короны» нашей Галактики порядка 1 Мпс. Пока еще трудно сказать, из чего состоят «короны» галактик — из газа или звезд-карликов. Если дальнейшие исследования подтвердят существование «скрытой» массы, то астрономам придется пересмотреть свои представления о массах отдельных галактик и скоплений галактик, допустив, что массы галактик и их скоплений раз в 10 больше, чем думали раньше.

Радиогалактики и активность ядер галактик

Некоторые галактики обладают исключительно мощным радиоизлучением. Это радиогалактики. Самая известная радио-

галактика находится в созвездии Лебедя. Она называется Лебедь А. Ее видимая звездная величина составляет примерно 17^m (без учета поглощения света в нашей Галактике). Но абсолютная звездная величина галактики Лебедь А, находящейся от нас на расстоянии около 200 млн. пс, достигает -21^m. Это такая же гигантская система, как и наша Галактика. Но в отличие от нашей и других «нормальных» галактик, Лебедь А излучает в радиодиапазоне больше энергии, чем в оптическом диапазоне. В Лебеде А имеется два ядра. Основываясь на этом, американские астрономы считали, что радиогалактика Лебедь А представляет собой результат столкновения двух галактик. Однако эта гипотеза оказалась опровергнутой. Признание получила точка зрения, обоснованная академиком В. А. Амбарцумяном, согласно которой в радиогалактике Лебедь А произошло разделение ядра и мы наблюдаем удаление друг от друга двух галактик, вызванное мощным взрывом в ядре галактики.

За миллион лет, в течение которого может продолжаться взрыв радиогалактики Лебедь А, излучается энергия порядка 10^{60}—10^{61} эрг. Если бы весь водород на Солнце превратился бы в гелий, то выделилось бы около 10^{52} эрг.

У скольких солнц должен выгореть весь водород, чтобы освободилась энергия, сравнимая с той, которую порождает взрыв в радиогалактике?

Другой известный источник радиоизлучения — шаровая галактика NGC5128 в созвездии Центавра. На фотографии этого объекта хорошо видны огромные облака пылевой материи, разделяющие галактику на две части.

О том, что взрывы в ядрах галактик действительно могут происходить, непосредственно свидетельствует открытие взрыва в ядре галактики NGC3034 или M82. В результате взрыва из центральных областей этой галактики была выброшена материя, масса которой составляет около 5,6 млн. масс Солнца, со скоростью 1000 км/с.

Какую кинетическую энергию приобрела выброшенная масса диффузной материи в результате взрыва в ядре галактики NGC3034?

В одной из ближайших к нам радиогалактик (Дева А) хорошо видна огромная светящаяся струя, внутри которой заметны отдельные сгущения. В соответствии с третьим законом механики такой выброс вещества должен сопровождаться контрвыбросом, направленным в противоположную сторону. И действительно, несколько лет назад такой контрвыброс из ядра радиогалактики был обнаружен. Особенность пространственного расположения, а может быть, и темная материя, оказавшаяся в направлении луча зрения, затрудняют наблюдение контрвыброса в этой «стреляющей» галактике.

Еще недавно считалось, что самые грандиозные проявления взрывных процессов — вспышки сверхновых. Однако очевидно, что при взрывах в ядрах галактик выделяется во много раз

больше энергии. В настоящее время трудно указать причину наблюдаемой активности ядер галактик. Согласно доводам академика Амбарцумяна, в состав ядер, кроме обычных звезд, должно входить вещество в виде гипотетических сверхплотных дозвездных тел, обладающих способностью самопроизвольно взрываться. Не исключено, что дозвездные тела содержатся и в ядре нашей, нормальной Галактики, из ядра которой тоже происходит выброс диффузной материи (масса ежегодно выбрасываемой материи достигает 1,5 массы Солнца). Вообще же активность ядер галактик проявляется в следующих основных формах: непрерывное истечение потоков вещества, выбросы сгустков газа и облаков газа с массой в миллионы солнечных масс, нетепловое радиоизлучение из околоядерной области, взрывы, превращение галактики в радиогалактику.

МЕТАГАЛАКТИКА И БЕСПРЕДЕЛЬНАЯ ВСЕЛЕННАЯ

Системы галактик

Галактики, подобно звездам, наблюдаются группами. Простейшие группы галактик двойные. Наша Галактика представляет собой кратную систему, в которую на правах спутников, кроме Магеллановых Облаков, входит ряд карликовых галактик («вкрапленных» в «корону» Галактики). Кратной является также и Туманность Андромеды, окруженная несколькими эллиптическими галактиками-спутниками.

Наша Галактика, Туманность Андромеды и еще около 20 ближайших к нам галактик образуют связанную группу — Местную систему. Местная система представляет собой сравнительно «небольшую группу», так как существуют скопления галактик, содержащие сотни, тысячи, а иногда и десятки тысяч членов.

Ближайшее к нам скопление находится в созвездии Девы. Тысячи галактик этого скопления образуют систему диаметром в несколько мегапарсек. Крупные скопления галактик находятся в созвездиях Волосы Вероники, Северная Корона, Геркулес и др.

Не входят ли скопления в состав еще больших систем? Данные внегалактической астрономии указывают на то, что, возможно, существует громадная Сверхгалактика диаметром в десятки мегапарсек. Предполагаемый центр Сверхгалактики — скопление галактик в созвездии Девы.

Метагалактика и ее расширение

Сверхгалактика — один из множества «архипелагов галактик» в беспредельной Вселенной. Современные телескопы и радиотелескопы позволили открыть космические объекты, находящиеся далеко за пределами Сверхгалактики. Вся охваченная наблюдениями часть Вселенной называется Метагалактикой. Пространство между галактиками не пусто, оно, по всей вероят-

ности, заполнено чрезвычайно разреженным межгалактическим газом, пронизывается космическими лучами, в нем существуют гравитационные и электромагнитные поля. От наиболее удаленных метагалактических объектов свет идет до нас миллиарды лет. И все-таки нет оснований отождествлять Метагалактику со «всей Вселенной» (в принципе возможно существование других, нам пока неизвестных метагалактик), а тем более с «материальным миром», со «всей материей».

Сравните прошлые представления о строении Вселенной (геоцентрическая система мира, гелиоцентрическая система мира) с современными.

В 1929 г. американский астроном Хаббл открыл замечательную закономерность: линии в спектрах подавляющего большинства галактик смещены к красному концу, причем смещение тем больше, чем дальше от нас находится галактика. Это явление называется «красным смещением». Первые измерения красных смещений ряда «туманностей» выполнил английский астроном Слайфер в 1917—1919 гг.

Считая, что причина красного смещения — эффект Допплера, мы приходим к выводу о непрерывном увеличении расстояния между нашей и другими галактиками. Конечно, галактики не разлетаются именно от нашей Галактики, которая не занимает никакого особого положения в Метагалактике, а происходит взаимное удаление всех галактик. Это означает, что наблюдатель, находящийся в любой галактике, смог бы, подобно нам, обнаружить красное смещение: ему казалось бы, что все галактики удаляются от него.

Нанесите мелом несколько точек на поверхность футбольной камеры. Надувая камеру, проследите, как будут меняться расстояния между точками.

Вывод о том, что Метагалактика нестационарна, долгое время многим ученым казался необычным и странным. Неоднократно предпринимались безуспешные попытки объяснить красное смещение не эффектом Допплера, а различными превращениями, которые якобы происходят с квантами света, идущими от внегалактических объектов. Сейчас разбегание галактик считается твердо установленным фактом. По величине красного смещения определены лучевые скорости галактик. У многих галактик они очень велики и достигают десятков тысяч километров в секунду.

Вычислите, какими приблизительно будут расстояние от Земли до Солнца, размеры Солнечной системы, размеры Галактики, а также расстояния до известных нам внегалактических объектов, если представить себе Солнце в виде шарика диаметром 1 см.

Современным оптическим и радиотелескопам доступна область пространства радиусом около 15 млрд. световых лет. Во сколько раз дальше, чем расстояние от Земли до α Центавра, удалось проникнуть астрономическим инструментам?

Закон, согласно которому красное смещение (а значит, и скорость удаления галактик!) пропорционально расстоянию до галактик, можно записать в виде:

$$v = Hr, \qquad (28)$$

где v — лучевая скорость галактики; r — расстояние до нее; H — постоянная Хаббла (Hubble). Определению численного значения H посвящено множество работ.

Одно из последних определений дает $H \approx 55$ км/(с·Мпс). Следовательно, темп расширения Метагалактики таков, что точки, разделенные расстоянием 1 Мпс ($30{,}86 \cdot 10^{19}$ км), удаляются друг от друга со скоростью 55 км/с; 10 Мпс — 550 км/с и т. д.

Измеренная лучевая скорость галактики 60 000 км/с. Каково расстояние до нее в световых годах?

Формулу $v = Hr$ часто называют законом Хаббла, подчеркивая этим фундаментальное значение закономерности в разбегании галактик.

Итак, мы живем в расширяющейся Метагалактике. Это не только подтверждают наблюдения (оптические и радиоастрономические), но это было предсказано теорией! В 1922 г. за несколько лет до открытия Хаббла выдающийся советский ученый А. А. Фридман (1888—1925), основываясь на теории относительности А. Эйнштейна, показал, что геометрические свойства Вселенной должны изменяться, т. е. расстояния между галактиками не могут оставаться постоянными. Открытие расширения Метагалактики — великолепный пример этого смелого научного предвидения. Известно, что даже Эйнштейн вначале не соглашался с выводами Фридмана и в 1922 г. подверг эти выводы критике. Однако в следующем году Эйнштейн опубликовал заметку, в которой, как и подобает большому ученому, признал, что его критика основывалась на допущенной им вычислительной ошибке, а результаты, полученные Фридманом, правильные.

Нынешний темп расширения Метагалактики известен. Если допустить, что в прошлом расширение Метагалактики происходило с таким же темпом, то можно, зная величину постоянной Хаббла, рассчитать, когда началось расширение. В самом деле, величина, обратная постоянной Хаббла, имеющая размерность времени, представляет собой промежуток времени от начала расширения Метагалактики (примерно 18 млрд. лет $= 5{,}7 \cdot 10^{17}$ с).

Расширение Метагалактики, безусловно, самое грандиозное из известных в настоящее время явлений природы. Правильное его истолкование имеет исключительно большое мировоззренческое значение. Не случайно в объяснении причины этого явления, решительно ломающего прежние представления о Вселенной, резко проявилось коренное отличие взглядов ученых, стоящих на позициях идеализма и материализма. Идеалисты и богословы сделали немало попыток «доказать», что расширение Метагалактики подтверждает религиозный вымысел об «акте творения» мира, о сверхъестественном божественном происхождении Вселенной. В отличие от них, материалисты стали искать и нашли в окружающем нас мире естественные реальные процессы, которые в прошлом могли вызвать наблюдаемое расширение. По всей вероятности, это взрывы. Их масштабы поражают

нас уже при изучении отдельных видов галактик. Можно представить, что расширение Метагалактики также началось с колоссального взрыва вещества, которое до взрыва было сосредоточено в сравнительно небольшом объеме и отличалось огромной плотностью и температурой.

Гипотеза «горячей Вселенной»

Ко времени начала расширения Метагалактики плотность и температура вещества, состоящего из различных элементарных частиц (например, нуклонов) и античастиц была очень велика. Как показывают расчеты, выполненные астрофизиками (в Советском Союзе академиком Я. Б. Зельдовичем и его учениками), по мере расширения чрезвычайно быстро изменялись не только температура и плотность вещества, но и состав входящих в него частиц, так как многие частицы и античастицы аннигилировали, порождая электромагнитные кванты излучения. Последних в современной нам Метагалактике оказалось неизмеримо больше, чем атомов, из которых состоят звезды, планеты, диффузная материя. Ученые считают, что всего лишь через несколько минут после начала расширения вещество уже имело плотность, близкую к плотности воды. А через несколько часов плотность стала сравнимой с плотностью нашего воздуха. Сейчас, по истечении миллиардов лет, оценка средней плотности вещества в Метагалактике приводит для $H=75$ км/(с·Мпс) к величине $5\cdot10^{-31}$ г/см^3.

Выполненные расчеты основаны на законах физики (механика, термодинамика, ядерная физика). Оказывается, что знание этих законов и некоторые предположения о распределении вещества в пространстве позволяют получить представление о процессах, происходивших миллиарды лет назад.

Существуют ли «экспериментальные» (т. е. основанные на данных непосредственных наблюдений) подтверждения гипотезы «горячей Вселенной»? Вероятно, сейчас мы можем ответить на этот вопрос положительно, так как в 1965 г. было сделано открытие, которое считается подтверждением идеи о том, что в прошлом вещество Метагалактики было очень плотным и горячим. Оказалось, что космическое пространство заполнено электромагнитными волнами, являющимися посланцами той древнейшей (реликтовой) эпохи развития Метагалактики, когда еще не было никаких звезд, галактик, туманностей. Это электромагнитное излучение называют реликтовым излучением. Реликтовое излучение пронизывает все пространство, все галактики; оно участвует в расширении Метагалактики.

Реликтовое излучение впервые было случайно открыто американскими учеными, изучавшими радиопомехи на волне 7,3 см. Очень интересно и важно, что, хотя это открытие было сделано случайно, существование реликтового излучения было теоретически предсказано астрофизиками. Предсказание существования

реликтового излучения и обнаружение его в космическом пространстве — еще один новый убедительный пример познаваемости мира и его закономерностей. Дальнейшее изучение движения и природы внегалактических объектов позволит получить новые данные о Вселенной. Но уже и сегодня мы представляем себе Вселенную совсем не так, как несколько десятилетий назад. Представление о звездах, находящихся в спокойном равновесном состоянии, сменилось представлением о бурных эволюционных процессах, происходящих на звездах и в ядрах удаляющихся друг от друга галактик. Такое коренное, революционное изменение представлений о Вселенной стало возможным благодаря применению новейших методов астрофизических исследований.

Исследование Вселенной прочно основывается на открытых в «земных условиях» законах физики. Эти законы позволили создать современные методы познания Вселенной и объяснить подавляющее большинство известных в настоящее время космических явлений. Однако не исключено, что в процессе познания Вселенной будут открыты новые диковинные явления, новые типы космических объектов, новые источники энергии, а может быть, и новые фундаментальные законы природы.

Космологические «модели» Вселенной

На стыке астрофизики, внегалактической астрономии, теоретической физики и новейших областей математики находится раздел астрономии, который называется космологией. Космология изучает не отдельные небесные тела и их системы, а строение Вселенной в целом, происходящие в ней процессы. С одним из таких процессов — расширением Метагалактики — вы уже познакомились. По существу открытие этого явления было предсказано А. А. Фридманом. На какие же представления о Вселенной он опирался? Оказывается, он, следуя Эйнштейну, использовал некоторую упрощенную математическую модель Вселенной, которая называется изотропной и однородной. В такой модели нет избранных, чем-то выделяющихся мест и направлений, поэтому она изотропна. Труднее представить себе Вселенную однородной, так как известно, что на самом деле вещество во Вселенной распределено неравномерно. Оно в основном сосредоточено в звездах, галактиках, скоплениях галактик. Но чем больше рассматриваемая система тел, тем меньше неоднородности в распределении вещества. Конечно, в Солнечной системе основная масса вещества сосредоточена в самом Солнце и считать, что здесь вещество распределено однородно, нельзя. Но в галактиках миллиарды звезд, а значит, вещество в них распределено более равномерно. В скоплениях галактик, а тем более в невообразимых по своим размерам сверхгалактиках неоднородность в распределении вещества еще меньше. Основываясь

на этом, допустимо в известном приближении рассматривать Вселенную как мир с однородным распределением вещества.

Требование однородности и изотропности вытекает из необходимости упрощения картины реального мира. Но такая идеализация полезна (как вы знаете, к ней очень часто приходится прибегать и в физике) и особенно нужна для математического исследования сложных процессов, происходящих в реальном мире. Предсказание о нестационарности Метагалактики как раз и опиралось на представление об однородной и изотропной Вселенной.

Мы знаем, что сейчас Метагалактика расширяется, а что будет с ней в дальнейшем? Вечно она будет расширяться или нет? А может быть, расширение когда-нибудь сменится сжатием? Теория А. А. Фридмана допускает различные возможности в зависимости от величины средней плотности материи (вещества и поля) во Вселенной. Например, если плотность материи меньше, чем $3 \cdot 10^{-29}$ г/см^3 (примерно 10 протонов в 1 м^3), то мы живем в «открытом» мире, т. е. в бесконечной Вселенной, в которой галактики всегда будут удаляться друг от друга. Данные о средней плотности ($5 \cdot 10^{-31}$ г/см^3) как будто бы указывают именно на этот случай.

Но если окажется, что в галактиках и их скоплениях действительно существуют «скрытые» массы, и если, кроме того, выяснится, что межгалактическое пространство не пусто и «заполнено» межгалактическим газом, то едва ли можно будет считать, что Метагалактике предстоит вечное расширение.

Так какая же все-таки Вселенная — «конечная» или «бесконечная»?

Может показаться, что в общем-то речь идет о давно решенном вопросе, ведь еще Демокрит высказывал идеи о бесконечности Вселенной в пространстве, о бесконечной Вселенной говорил Джордано Бруно. Но на протяжении двух тысячелетий бесконечным пространством считалось такое, которое просто не имеет конца ни в какую сторону, которое не имеет границ, которое является пустым безграничным вместилищем вещества. Что же изменилось сейчас? С появлением теории тяготения Эйнштейна стало ясно, что пространство и время неразрывно связаны с материей. «Раньше полагали,— писал Эйнштейн,— что если бы из Вселенной исчезла вся материя, то пространство и время сохранились бы, теория относительности утверждает, что вместе с материей исчезли бы пространство и время». Значит, изменились наши представления о геометрии мира, изменились наши представления о самом понятии «бесконечность».

Гигантские массы вещества искривляют пространство, оно перестает быть евклидовым, в нем лучи света не распространяются прямолинейно, в нем кривая (а не прямая линия) — кратчайшее расстояние между двумя точками. Неевклидово пространство может быть неограниченным и в то же время конечным.

В этом нет ничего удивительного (вспомните, ведь и шаровая поверхность — сфера — не имеет границ, она безгранична; в то же время она конечна и ее площадь вы умеете вычислять). Трудно наглядно представить себе искривленное трехмерное пространство, но и оно, подобно двухмерному неевклидовому пространству, может быть безграничным и конечным. Вот почему в современной космологии обсуждается (и еще не решен окончательно) вопрос о геометрических свойствах Вселенной.

ЗАГАДОЧНЫЕ КВАЗАРЫ

Среди блестящих открытий, сделанных в астрономии 60—70-х годов XX в., квазары (от слов quasi stellar radio sources — квазизвездные радиоисточники) занимают особое место. Обнаруженные в начале 60-х годов, квазары до сих пор остаются загадочными объектами (хотя их открыто несколько сот), вокруг вопроса о природе которых ведутся острые споры. Квазары принимали за ближайшие звезды, объявляли самыми далекими объектами Вселенной, о них говорили и как о совершенно новом типе небесных тел, отличном от всех ранее известных, и как... о проявлениях деятельности внеземных сверхцивилизаций.

История открытия

Открытие квазаров, радиоисточников, внешне похожих на звезды, стало возможным благодаря прогрессу в области радиоастрономии. Как и в оптической астрономии, в радиоастрономии важно добиться хорошего углового разрешения (минимальное угловое расстояние, при котором можно раздельно наблюдать точечные объекты). Оно зависит от отношения длины волны принимаемого излучения к диаметру «объектива» телескопа. Поскольку длина радиоволн нередко в миллионы раз больше, чем длина оптических волн, то угловое разрешение самых крупных радиотелескопов не превышает разрешения невооруженного глаза (около 60″). Однако положение улучшилось после создания радиоинтерферометров, представляющих в простейшем случае пару антенн, соединенных высокочастотным кабелем. Антенны принимают космические радиосигналы, передают их по кабелю, далее сигналы суммируются, усиливаются, детектируются, а затем регистрируются на ленте самописца. Усиление сигнала совершенно необходимо, так как принимаемая энергия ничтожна: мы затрачиваем во много раз больше энергии, поднимая с пола листок бумаги, чем та, которую все радиотелескопы улавливают с помощью своих антенн.

Расстояние между антеннами радиоинтерферометра может быть очень большим, если «соединить» радиотелескопы, находящиеся в разных точках земного шара. Правда, в этом случае отказываются от кабельной связи и одновременно записывают

принимаемые сигналы на магнитную ленту, а потом совместно обрабатывают данные наблюдений. Одним из первых идею этого замечательного метода «сверхдальней радиоинтерферометрии» предложил в 1963 г. молодой советский ученый, ныне член-корреспондент АН СССР Н. С. Кардашев. Уже через несколько лет были успешно осуществлены советско-американские эксперименты, в результате которых удалось достичь рекордное угловое разрешение, почти в 100 раз превышающее разрешение лучших оптических телескопов.

Еще до получения столь великолепных результатов первые радиоинтерферометры, разрешение которых не превышало 1″, позволили установить местоположение на небе нескольких точечных радиоисточников и отождествить их с оптическими объектами, похожими на звезды. Астрономам вначале казалось, что они открыли «радиозвезды», но скоро стало ясно, что новые объекты не могут быть даже необыкновенными звездами...

Стремясь как можно точнее определить положение на небе радиоисточника 3С 273 (номер источника по Третьему каталогу, составленному в Кембриджском университете), австралийские ученые решили использовать покрытие («затмение») этого радиоисточника Луной. Эксперимент прошел удачно: 3С 273 отождествили со звездообразным объектом $+13^m$ и установили, что он состоит из двух частей, одна из которых по виду напоминает звезду, а другая — протяженный выброс. Очень важно, что вся радиокартина хорошо совпадала с оптической. Это подтверждало правильность отождествления 3С 273 — самого близкого и самого яркого из известных ныне квазаров.

Отметьте местоположение квазара 3С 273 на своих картах звездного неба, зная координаты квазара $\alpha = 12^ч27^м$ и $\delta = 2°20'$. В каком созвездии находится этот квазар? Во сколько раз блеск самого яркого квазара меньше блеска Полярной звезды?

В дальнейшем по мере создания совершенных радиоинтерферометров началось более тщательное исследование структуры квазара 3С 273 и некоторых других квазаров. Оказалось, например, что звездоподобная часть квазара 3С 273 имеет очень сложное строение. Размеры ее около 1″, и она распадается на ядро и две компоненты, которые удалены друг от друга на 0″,08 и имеют размеры 0″,01. Само же ядро также состоит из «мелких» деталей: в нем «прощупываются» детали размерами до 0″,0002. Что выявят последующие исследования?

Оптические спектры

Когда был получен спектр этого «яркого» объекта, астрономы столкнулись с тем, что спектральные линии невозможно приписать ни одному из известных химических элементов! Подобная ситуация в астрофизике возникала неоднократно. Так, например, в конце прошлого века были открыты загадочные линии в спектрах планетарных туманностей. Их даже припи-

сали новому элементу «небулию», но в конце 20-х годов выяснилось, что этот элемент, которому не находилось места в таблице Менделеева, представляет собой не что иное, как многократно ионизованный кислород и азот... Лишь в 40-х годах удалось «разоблачить» другой «элемент» такого же рода — «короний». Думали, что это совершенно неизвестный на Земле очень легкий газ, содержащийся в солнечной короне. На самом же деле линии «корония» принадлежали многократно ионизованному железу и некоторым другим хорошо известным на Земле химическим элементам. Так астрофизика не опровергла, а подтвердила фундаментальное значение открытой Менделеевым периодической системы. Вместе с тем стало ясно, что условия в необъятной «космической лаборатории» могут резко отличаться и от привычных условий, которые нас окружают, и от тех, которые физики специально создают в своих лабораториях.

В истории открытия и исследования квазаров разгадку «таинственных» линий нашел голландский астрофизик Маартин Шмидт, работающий на обсерватории Маунт Паломар. Шмидт заметил, что четыре из шести линий, видимых в спектре 3С 273, образуют последовательность, напоминающую серию спектральных линий атомов, имеющих по одному электрону. Но, так как ни у водорода, ни у водородоподобных атомов (т. е. у атомов, оставшихся с одним электроном) таких линий не было, Шмидт предположил, что это обычная бальмеровская серия водорода, линии которой сильно сдвинулись к красному концу спектра. Такой сдвиг Шмидт связал с хорошо известным вам эффектом Допплера, приписав квазару 3С 273 красное смещение $z=0{,}16$. Напомним, что

$$z=\frac{\lambda-\lambda_0}{\lambda_0}=\frac{v}{c};$$

учитывая соотношение (28), получим:

$$r=\frac{c}{H}z. \qquad (29)$$

Вскоре гипотеза Шмидта была подтверждена отождествлением линий в спектрах других квазаров. «Загадочные» линии оказались принадлежащими водороду, углероду, кислороду, натрию, магнию, кремнию и другим химическим элементам (вплоть до железа), т. е. тем элементам, которые обычно присутствуют в атмосферах звезд.

Отличительная особенность непрерывного спектра квазаров — большая интенсивность излучения в ультрафиолетовом диапазоне. При рассмотрении линейчатого спектра обращают на себя внимание, кроме узких линий поглощения, широкие линии излучения, свидетельствующие о скоростях движения газа порядка 10^3 км/с. Наличие линий двух- и трехкратно ионизованных атомов, а также уширение линий говорят о том, что порождающий излучение газ горячий (температура порядка 10^4 К) и весьма разреженный (10^{-20} г/см^3).

Распределение на небе и расстояния

Видимое распределение квазаров на небе напоминает распределение на нем галактик. Одна из особенностей последнего связана с «зоной избегания». В ней галактики не видны просто из-за сильного поглощения света, которое вызывают расположенные вблизи Млечного Пути облака межзвездной пыли. Так вот квазары тоже избегают эту зону, а значит, они находятся вне нашей Галактики. Решающее слово в вопросе о том, внутри или вне Галактики находятся квазары, было сказано лишь после определения расстояний до квазаров. Если считать, что красное смещение квазаров обусловлено эффектом Допплера, то расстояние до ближайших к нам квазаров можно оценить по формуле (29).

Вычислите расстояние до квазара 3С 273.

Так как 3С 273 — ближайший к нам квазар (расстояние до него «всего лишь» около 3 млрд. световых лет), то у других квазаров красное смещение, естественно, больше. Несколько десятков квазаров имеют $z>2$ (красное смещение самых далеких галактик не превышает 0,5).

Светимости, размеры, массы и время жизни квазаров

Но если квазары так далеки от нас, а мы их все-таки видим, то они должны излучать огромное количество энергии. В оптическом диапазоне квазары излучают примерно 10^{46} эрг/с, это раз в 100 больше излучения обычных галактик. Примерно на порядок больше излучение многих квазаров в инфракрасном диапазоне.

Сколько солнц излучают такую же энергию, как один квазар?

Огромное значение для выяснения природы квазаров имеет определение их размеров. Но как «измерить» квазары? Ответ на этот вопрос нашли московские астрономы Ю. Н. Ефремов и А. С. Шаров, которые отыскали в «стеклянном архиве» Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга десятки фотопластинок, где с 1896 г. «позировал» квазар 3С 273. Внимательно рассмотрев эти драгоценные материалы, советские астрономы пришли к выводу, что 3С 273 — объект переменного блеска (от $12^m,0$ до $12^m,7$). Аналогичное открытие сделали астрономы Гарвардской обсерватории, обнаружившие некое подобие цикличности (продолжительность цикла около 10 лет) и всплески блеска, охватывающие всего лишь несколько дней.

Какое же отношение все это имеет к определению размеров квазаров? Оказывается, самое непосредственное: размеры излучающей области квазара в оптическом диапазоне не могут превышать нескольких световых дней, иначе свет от разных частей

квазара приходил бы в разные моменты времени и мы не видели бы переменности блеска объекта.

Циклическая переменность блеска обнаружена лишь у очень немногих квазаров. Однако колебания блеска весьма характерны для квазаров и иногда бывают очень ощутимыми: квазар 3С 446 примерно за год увеличил свой блеск в 20 раз. Последующие наблюдения квазаров показали, что они обнаруживают переменность блеска и в радиодиапазоне.

Полагая, что размеры квазара порядка световой недели, сравните их с размерами Солнца, Солнечной системы, Галактики.

Абсолютная звездная величина квазара 3С 446 достигает -29^m. Какова его светимость?

Оценить массу квазаров можно на основе различных методов. Например, зная ширину спектральных линий излучения и соответствующую ей скорость движения газа (10^3 км/с), можно рассчитать, какой должна быть минимальная масса квазара, чтобы гравитационные силы удерживали газ в объеме, занимаемом квазаром. Результат такого расчета $M \approx 10^8 M_{\odot}$.

Сходный результат получается и из других соображений. Известно, что выброс из квазара 3С 273 имеет длину порядка 10^5 световых лет. Допустим, что с момента своего образования он двигался со скоростью, близкой к скорости света. Тогда возраст выброса 10^5 лет. Светимость квазара мы знаем: 10^{46} эрг/с $= 10^{53}$ эрг/год. За 10^5 лет квазар излучил 10^{58} эрг. Предположим, что это лишь 1% запаса энергии квазара, т. е. его полная энергия 10^{60} эрг. Такой энергии по формуле ($\varepsilon = mc^2$) соответствует масса $10^8 M_{\odot}$.

Советские ученые Я. Б. Зельдович и И. Д. Новиков пришли к такому же выводу, рассматривая квазар как огромную «сверхзвезду», в которой гравитационное давление уравновешивает силы внутреннего давления (преимущественно давления излучения).

Итак, массы квазаров не менее 100 млн. масс Солнца, но возможно, что они и больше. Как долго могут существовать квазары, каково их время жизни? Ответ связан с проблемой устойчивости квазаров. Можно предположить, что и в квазарах устойчивость обеспечивается вращением. Но каков его характер? Если допустить, что квазар вращается как твердое тело, то, как показывают расчеты, уже через 10^4 лет он потеряет устойчивость. В тысячу раз больше будет продолжительность жизни квазара (т. е. время существования квазара как устойчивой системы), если допустить, что квазар вращается не как твердое тело и угловая скорость убывает к «поверхности». Устойчивость квазара может обеспечиваться и магнитным полем, но и в этом случае квазары не будут относиться к долгожителям Вселенной. Таким образом, время жизни квазара не превышает 10^7 лет, т. е. сравнимо с геологическими, а не космологическими масштабами времени.

Квазары и квазароподобные объекты

Представляют ли квазары совершенно новый тип космических объектов или у них все-таки есть «родственники»? Или они представляют собой какую-то стадию эволюции галактик (ведь оказались же белые карлики и нейтронные звезды стадией в эволюции звезд)? Окончательный ответ на этот вопрос будет связан с выяснением природы квазаров. Но уже сейчас можно сравнить характерные особенности квазаров со свойствами других космических объектов. Такое сравнение показывает, что ряд «квазарных» свойств встречается при рассмотрении ядер различных активных галактик. К таким галактикам прежде всего относятся сейфертовские галактики (названные так по имени открывшего их астронома К. Сейферта) и радиогалактики. С сейфертовскими галактиками квазары сближает явное сходство радиоспектров и инфракрасных спектров, а также наличие в ядрах компактных радиоисточников. С радиогалактиками — мощность энерговыделения и структура. Мы знаем, что ядра радиогалактик — исключительно мощные источники излучения (правда, уступающие квазарам). Кроме того, и в радиогалактиках, и в квазарах существуют радиоизлучающие области, симметрично расположенные по отношению к оптическому объекту.

Таким образом, едва ли нужно считать квазары «монстрами» Вселенной. Квазары, бесспорно, одни из самых редких космических объектов. Но предстоит еще выяснить, насколько самостоятелен этот тип объектов, не является ли он кратковременной стадией в жизни обычных галактик. Глядя на червеобразную гусеницу, порой бывает трудно представить, что скоро она превратится в куколку, а затем и в прекрасную бабочку. Однако не всякому червяку дано стать бабочкой, как и не всякой обезьяне — человеком! Может быть, квазары есть ранняя стадия в формировании будущих галактик.

Гипотезы о природе квазаров

Прежде всего суммируем все сказанное о квазарах. Это объекты чрезвычайно компактные (10^{17} см), массивные ($10^8\ M_\odot$), обладающие огромной светимостью ($L = 10^{46}$ эрг/с), удаленные на миллиарды световых лет (до $10 \cdot 10^9 - 12 \cdot 10^9$ свет. лет), короткоживущие (10^7 лет), довольно редкие, но имеющие немало сходных черт с другими внегалактическими объектами.

Давая такую характеристику квазарам, мы исходим из того, что наблюдаемые красные смещения в спектрах квазаров имеют допплеровскую природу, т. е. свидетельствуют об удалении квазаров. Подобное представление о квазарах стало в настоящее время господствующим. По вопросу о природе квазаров существуют различные точки зрения. Вот три из них.

1. Квазар — компактное звездное скопление. Сторонники этой гипотезы объясняют феноменальные свойства квазаров столкновениями звезд, которые происходят сейчас или проис-

ходили раньше в ядрах галактик или компактных и массивных звездных скоплениях. Считается, что результатом столкновений может быть разрушение звезд и выделение очень большой энергии или «слипание» звезд, приводящее к образованию неустойчивых массивных звезд. Они вскоре вспыхивают как сверхновые, порождая нейтронные звезды. Однако для таких столкновений требуются исключительно плотные скопления, содержащие до 10^{11} звезд в 1 пс^3 (сравните со средней плотностью звезд в ядре Галактики — 10^2 пс$^{-3}$, в ядре галактики Андромеды — не более 10^7 пс$^{-3}$). Есть и другие трудности у этой гипотезы, например сложно согласовать ее с циклическими изменениями блеска квазаров.

2. Квазары — объекты, содержащие «черные дыры». «Черные дыры» — это предсказанные теорией космические объекты, в которые должны превращаться очень массивные звезды на последней стадии своего развития. «Черные дыры» — результат катастрофического сжатия («коллапс»), которому не могли воспрепятствовать внутренние силы звезды (к вопросу о «черных дырах» мы еще вернемся). Гравитационный коллапс, приводящий к образованию «черных дыр», может сопровождаться выделением огромной энергии, что характерно для квазаров. Кроме гравитации, только аннигиляция вещества и антивещества способна породить такую колоссальную энергию. Однако коллапсирующий объект, ушедший под «критический» или «гравитационный» радиус, мы не можем видеть, поскольку из него вообще не могут выходить ни излучение, ни какие-либо частицы. Поэтому то, что мы воспринимаем как «квазар», не есть картина коллапса, а результат выделения энергии при падении окружающего вещества на «черную дыру», ибо она взаимодействует с окружающим миром только через гравитационное притяжение.

Но и эта гипотеза встречается с существенными трудностями: из ядер галактик обычно наблюдается извержение вещества, а не его падение; наблюдаемые свойства излучения квазаров трудно (а подчас и невозможно) получить из анализа падения вещества на «черные дыры».

3. Квазар — компактное единое тело. К такому выводу приходят сейчас многие исследователи квазаров, сопоставляя все известные свойства этих объектов. Но как именно устроено это «единое тело», содержит ли оно только газ или имеет более сложное строение и в него входят звезды — пока далеко не ясно. Я. Б. Зельдович и И. Д. Новиков детально разрабатывают гипотезу, в которой квазар рассматривается как быстровращающаяся сверхмассивная звезда. Другой советский ученый доктор физико-математических наук Л. М. Озерной считает, что ядро квазара — сверхмассивное плазменное тело с большими внутренними движениями и магнитными полями. Такое тело названо «магнитоидом». Форма магнитоида может быть различной (шар, эллипсоид, «диск»), ось вращения не обязательно должна совпа-

дать с магнитной осью (наклонный ротатор, подобный пульсару). Анализ истечения вещества магнитоида и прохождения через его «магнитосферу» приводит к объяснению многих наблюдаемых особенностей квазаров.

Однако ни перечисленные гипотезы, ни ряд других, о которых здесь не упомянуто, пока еще не могут претендовать на общее признание. Это и понятно: ведь речь идет о чрезвычайно сложной проблеме, для решения которой мобилизованы самые совершенные астрономические инструменты и весь арсенал современной теоретической физики — от квантовой механики до теории относительности.

Спрашивается, а так ли уж нужно знать, что представляют собой объекты, от которых свет идет к нам раза в 2—2,5 дольше, чем существует Земля и Солнечная система. Безусловно, нужно! В изучении квазаров заинтересованы астрофизики и космологи, прежде всего, потому, что квазары позволяют охватить астрономическими наблюдениями необозримые просторы Вселенной. В разгадке тайн квазаров заинтересованы физики, которые, по-видимому, не без основания надеются получить новые сведения о свойствах вещества и необыкновенно эффективных источниках энергии. Ведь энерговыделение в квазарах, рассчитанное на 1 г вещества, в 10^2 раз больше в оптическом и в 10^3 раз больше в радиодиапазоне, чем энерговыделение Солнца и других звезд. Подсчеты показывают, что ежесекундно квазар излучает такую энергию, которой хватило бы на протяжении миллиарда лет для удовлетворения нужд людей в электричестве... А остаются ли «обычными» свойства времени и пространства вблизи гигантских масс вещества квазаров? Может быть, именно в квазарах сверхплотное дозвездное вещество, предсказанное В. А. Амбарцумяном, переходит в вещество звезд и межзвездной среды? Хватит ли «земной» физики для объяснения того, что делается в квазарах? На эти и многие другие вопросы дадут ответы дальнейшие наблюдения и теоретические исследования.

Но уже сейчас можно с полной определенностью подчеркнуть, что открытия в области астрофизики являются прекрасным подтверждением замечательной мысли В. И. Ленина о том, что «ум человеческий открыл много диковинного в природе и откроет еще больше, увеличивая тем свою власть над ней...» [1].

РОЖДЕНИЕ, ЖИЗНЬ И СМЕРТЬ ЗВЕЗД

Постановка космогонической проблемы

Небесные тела находятся в непрерывном движении и изменении. Десятки тысяч лет назад небо Земли украшали фигуры других созвездий, миллиарды лет назад вообще еще не было

[1] Ленин В. И. Полн. собр. соч. Изд. 5-е, т. 18, с. 298.

Земли, Луны, планет, Солнца, многих звезд и галактик. Но вечно существовала материя, из которой впоследствии образовались галактики, звезды, планеты. Когда и как именно это произошло, наука стремится выяснить, изучая небесные тела и их системы. Раздел астрономии, занимающийся проблемами происхождения и развития небесных тел, называется космогонией. Звездная космогония изучает проблемы, связанные со звездами, а планетная космогония — с планетами.

Современные научные космогонические гипотезы — результат физического, математического и философского обобщения многочисленных наблюдательных данных. В космогонических гипотезах, присущих данной эпохе, в значительной мере находит свое отражение общий уровень развития естествознания. Дальнейшее развитие науки, обязательно включающее в себя астрономические наблюдения, подтверждает или опровергает эти гипотезы. Подтверждаются те гипотезы, которые не только могут объяснить уже известные из наблюдений факты, но и предсказать новые открытия.

В космогонии, как и в космологии, не обсуждается вопрос о происхождении Вселенной. Сама постановка такого вопроса бессмысленна, поскольку Вселенная вечна. Вселенная не имела начала и не будет иметь конца. Возникшие в далекой древности религиозные легенды о сотворении мира богом ничего не объясняют. Верить этим легендам, не выдерживающим никакой научной критики, могут сейчас только люди, совершенно незнакомые с достижениями современной науки.

Данные космогонии подтверждают, что «...учению религии, например, о прошлом земли и о сотворении мира не соответствует никакой объективной реальности. Учению науки о том, что земля существовала *до* всякой социальности, *до* человечества, *до* органической материи, существовала в течение *определенного* времени, в *определенном* по отношению к другим планетам пространстве,— этому учению (хотя оно так же относительно на каждой ступени развития науки, как относительна и каждая стадия развития религии) *соответствует* объективная реальность» [1].

Возраст галактик и звезд

Вселенная существует вечно. Значит, она не имеет возраста. Возраст Метагалактики $H^{-1} \approx 2 \cdot 10^{10}$ лет. По-видимому, близок к нему и возраст галактик, которые, согласно теориям, разрабатываемым советскими учеными, сформировались на какой-то (довольно ранней!) стадии расширения Метагалактики. Каждая звезда тоже образовалась в определенный момент времени. От него и отсчитывается ее возраст. Звезды возникли не одновременно, а следовательно, должны встречаться «старые» и «молодые» звезды.

[1] Ленин В. И. Полн. собр. соч. Изд. 5-е, т. 18, с. 194—195.

Возраст звезд определяют различными методами. Один из них основан на изучении звезд шаровых скоплений и рассеянных скоплений. Естественно предположить, что звезды, входящие в скопления, возникли одновременно и имеют одинаковый возраст. Самые «старые» звезды должны входить в длительно существующие скопления (шаровые). Они состоят из красных и желтых звезд, возраст которых достигает миллиардов лет. Наоборот, в рассеянных звездных скоплениях, значительно менее устойчивых, чем шаровые, должны находиться «молодые» звезды. Это белые и голубые сверхгиганты. Например, возраст звезд скоплений χ и η Персея всего лишь несколько миллионов лет. Звездные ассоциации, неустойчивые звездные скопления, которые открыты и исследованы в Бюраканской астрофизической обсерватории, иногда распадаются за время, меньшее миллиона лет, а потому в их состав входят самые «молодые» звезды. Обнаружение звездных ассоциаций позволяет сделать исключительно важный вывод о том, что звезды возникают группами и процесс звездообразования продолжается в настоящее время.

Классические представления о происхождении звезд

Большинство астрономов считают, что звезды (и даже целые галактики) образуются в результате сгущения (конденсации) облаков газа. Одна из исходных предпосылок этой гипотезы состоит в том, что, как показывают наблюдения, молодые звезды всегда связаны с газом и пылью. Эти звезды, звездные ассоциации и диффузная материя концентрируются в спиральных рукавах Галактики. Здесь, в спиральных ветвях нашей и других галактик, рождаются звезды. Молодые, горячие (они относятся к ранним спектральным классам и имеют температуру поверхности $20—30 \cdot 10^3$ K), эти звезды обладают большой светимостью. Благодаря им спиральные ветви, сосредоточившие в себе небольшую часть массы Галактики, четко выделяются на фотографиях.

Представим себе, что под действием самогравитации начало сжиматься холодное газо-пылевое облако. При сжатии будут возрастать плотность и температура облака. Возникнет будущая, рождающаяся звезда («протозвезда»). Температура ее поверхности пока еще мала, но протозвезда уже излучает небольшое количество энергии, и поэтому рождающиеся звезды можно надеяться обнаружить, например, среди довольно многочисленных источников инфракрасного излучения. Поиски протозвезд сейчас ведутся на многих обсерваториях. Сгустки газа размером меньше парсека и с плотностью в десятки тысяч раз больше обычной плотности межзвездной среды удается наблюдать в виде маленьких темных туманностей (глобул).

Астрономы пытаются обнаружить протозвезды и радиометодами. Вероятно, с возникающими звездами могут быть связаны

недавно открытые облака газа, содержащие большое количество молекул гидроксила (OH). Радиотелескопы способны с огромных расстояний принять излучение этих областей.

Одно из основных отличий протозвезды от звезды заключается в том, что в протозвезде еще не происходят термоядерные реакции, в ней еще нет основного источника энергии обычных звезд. Термоядерные реакции начинаются тогда, когда в процессе сжатия протозвезды температура в ее недрах достигнет нескольких миллионов градусов. С этого времени стадия сжатия звезды прекращается: сила внутреннего давления газа теперь уже может уравновесить силу тяготения внешних частей звезды. Стадия сжатия звезд, масса которых значительно больше массы Солнца, продолжается всего лишь сотни тысяч лет, а звезды, массы которых меньше солнечной, сжимаются сотни миллионов лет. Чем больше масса звезды, тем при большей температуре достигается равновесие. Поэтому у массивных звезд самые большие светимости (соотношение «масса — светимость»).

Гипотеза В. А. Амбарцумяна о происхождении звезд и галактик

Академик В. А. Амбарцумян и его сотрудники пытаются обосновать гипотезу, согласно которой звезды образуются не из разреженного, а из сверхплотного вещества. Мы уже знаем, что в нашей Галактике открыты звездные ассоциации, содержащие самые молодые из известных звезд. Звездные ассоциации открыты и в других галактиках. Предполагается, что звезды и диффузные туманности рождаются именно в ассоциациях. Расширение ассоциаций позволило сделать вывод о том, что в момент своего образования звезды приобретают большую энергию. В. А. Амбарцумян считает, что эта энергия освобождается в результате взрыва каких-то, пока неизвестных нам «дозвездных» тел. Делается попытка объяснить взрывами загадочных сверхплотных тел происхождение не только звезд, но и галактик. Предполагается, что не ядра образуются в галактиках, а галактики возникают вокруг активных ядер. С течением времени ядра галактик, претерпевая взрывы и деления, теряют огромные массы вещества и постепенно могут вообще исчезнуть.

Гипотеза В. А. Амбарцумяна позволила предсказать ряд нестационарных процессов, происходящих в мире звезд и галактик. В свете этой гипотезы, имеющей, однако, мало сторонников, такие явления, как вспышечная активность и взрывы некоторых звезд, активность ядер галактик, включая взрывы в ядрах галактик, рассматриваются не как случайные, а закономерные и очень важные фазы в эволюции небесных тел.

Дальнейшее развитие науки покажет, какие из сегодняшних представлений о происхождении звезд окажутся правильными. Но уже теперь нет сомнения в том, что звезды, подчиняясь законам природы, рождаются, живут и умирают, а не были однаж-

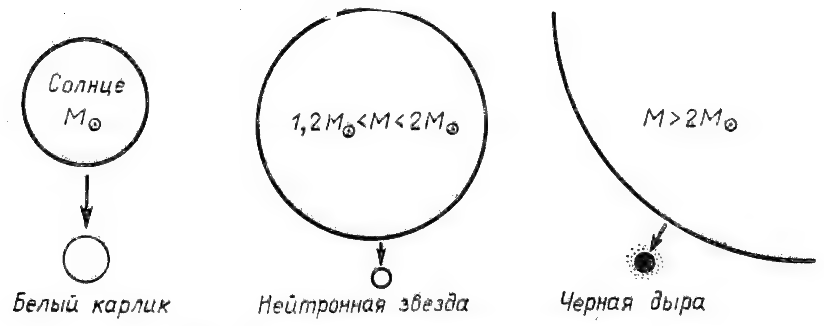


Рис. 16. Конечные стадии эволюции звезд.

ды созданы и не остались вечно неизменными объектами Вселенной.

Как эволюционируют звезды

Мы видели, что существуют различные точки зрения на «предысторию» звезды, т. е. на то, как возникают звезды и живут до вступления на главную последовательность. Но вот звезда тем или иным путем пришла на главную последовательность. Как эволюционирует такая звезда?

Эволюция стационарной звезды сопровождается постепенным «выгоранием» водорода. Время пребывания звезды на главной последовательности зависит от массы звезды. Массивные звезды, излучающие большое количество энергии, эволюционируют быстро и находятся в стационарной стадии только несколько миллионов лет, а звезды, подобные Солнцу,— миллиарды лет.

Когда весь водород в центральной области звезды превратится в гелий, внутри звезды образуется гелиевое ядро. Теперь уже водород будет превращаться в гелий не в центре звезды, а в слое, прилегающем к очень горячему гелиевому ядру. Пока внутри гелиевого ядра нет источников энергии, оно будет постепенно сжиматься и при этом еще более разогреваться. Когда температура внутри звезды превысит 13—15 млн. градусов, гелий начнет превращаться в углерод. Как показывают расчеты, светимость и размеры звезды будут возрастать. В результате обычная звезда постепенно превратится в красного гиганта или сверхгиганта. Такие звезды, как мы знаем, занимают особое положение на диаграмме «спектр — светимость».

Недавно выяснилось, что многие звезды, по-видимому, не сразу становятся стационарными гигантами, а некоторое время пульсируют, как бы проходя в своем развитии стадию цефеид.

Заключительный этап жизни звезды, как и вся ее эволюция, решающим образом зависит от массы звезды (рис. 16). Оболочки звезд, подобных нашему Солнцу (но с массами, не большими 1,2 $M_\odot$), постепенно расширяются и в конце концов совсем покидают ядро звезды. На месте гиганта остается маленький

и горячий белый карлик. Белых карликов в мире звезд много. Это значит, что, по-видимому, многие звезды превращаются в белых карликов, которые затем постепенно остывают, становясь «потухшими звездами».

Иная судьба у более массивных звезд. Если масса звезды примерно вдвое превышает массу Солнца, то такие звезды на последних этапах своей эволюции теряют устойчивость, в частности они могут взорваться как сверхновые.

По одной из гипотез вспышка сверхновой происходит после того, как в центре звезды возникнет железное ядро. Это значит, что далеко в прошлом остались процессы выгорания водорода и образования гелия, углерода, кислорода. В звезде уже возникли такие элементы, как магний, кремний, сера и другие, до железа включительно. На такой стадии звезда продолжает терять энергию за счет электромагнитного и нейтринного излучения. Однако основным источником этой энергии теперь уже становятся не термоядерные реакции внутри звезды, а ее гравитационное сжатие, сопровождающееся повышением температуры внутри звезды до нескольких миллиардов градусов. В условиях таких чудовищных температур и давлений ядра атомов железа, поглощая энергию, распадаются на нейтроны, протоны, ядра гелия. Внутреннее давление уже не в состоянии противостоять гравитационному сжатию. Верхние слои звезды падают к ее центру. Такое падение сопровождается быстрым выделением потенциальной энергии тяготения и сбросом оболочки, массы которых у одних вспыхивающих звезд не превышают десятка долей массы Солнца, а у других — в несколько раз больше массы Солнца. Если оставшаяся после сброса оболочки масса звезды не превышает $2M_{\odot}$, то возникает нейтронная звезда с уже известными нам удивительными свойствами.

Если же масса оставшейся звезды более чем вдвое превышает массу Солнца, то такой звезде вообще не суждено достигнуть устойчивого состояния, она будет буквально раздавлена собственной тяжестью. В процессе неограниченного сжатия (коллапса) она превратится в необыкновенный объект — «черную дыру» (рис. 17). Такое странное название связано с тем, что могучее поле тяготения сжавшейся звезды не выпускает за ее пределы любое излучение (свет, рентгеновские лучи и т. д.). К счастью, звезды, подобные Солнцу, не вспыхивают как сверхновые и им не угрожает коллапс. Но если бы такая катастрофа произошла с Солнцем, то его гравитационный радиус стал бы равным 3 км.

Какими стали бы средняя плотность Солнца по сравнению с современной (1,4 г/см^3) и параболическая скорость на его поверхности (сейчас она 619 км/с), если бы радиус Солнца стал равным 3 км? (Возможной потерей массы пренебречь.)

«Черные дыры» — объекты, подчиняющиеся общей теории относительности А. Эйнштейна. Здесь, в частности, уже необхо-

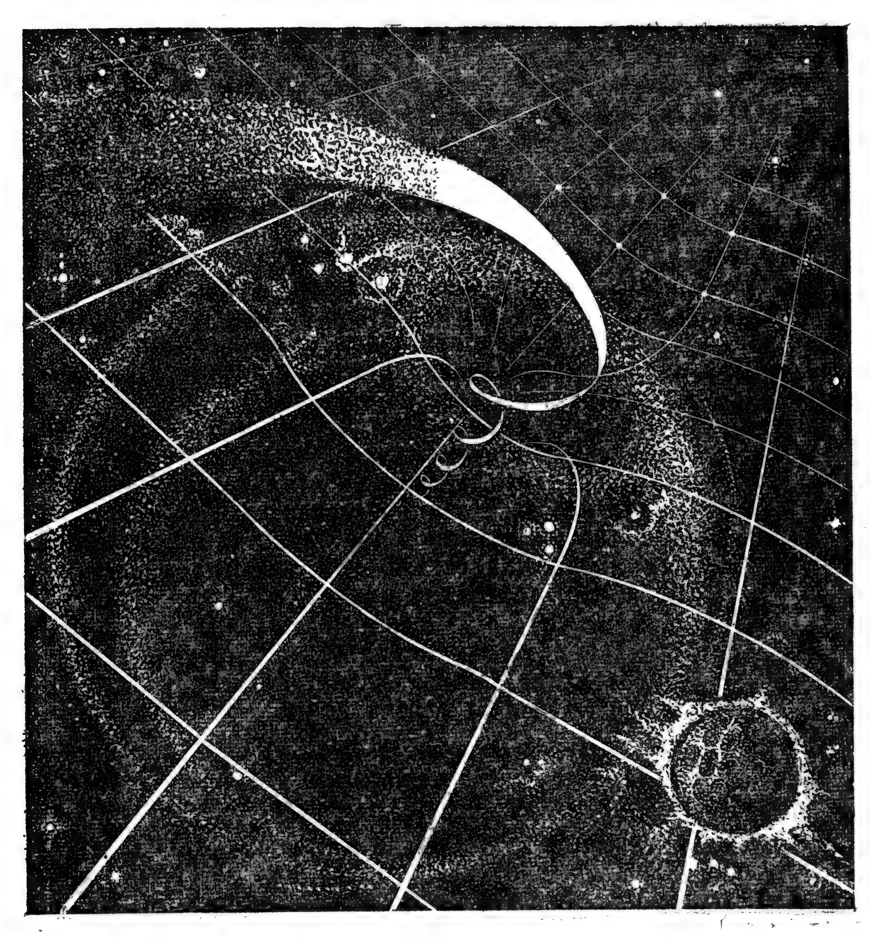


Рис. 17. «Черная дыра».

димо учитывать замедление времени в сверхсильных гравитационных полях. «Наблюдатель», находящийся на коллапсирующей звезде, недолго бы «любовался» картиной коллапса. Иное дело — внешний наблюдатель, расположившийся на безопасном расстоянии от звезды. Ему процесс коллапса покажется бесконечно длительным, он вообще не увидит звезду, достигшую критического радиуса: сигналы от нее будут поступать все реже и реже, пока совсем не прекратятся. Поэтому «черную дыру» вообще нельзя «увидеть» ни в каком диапазоне электромагнитных волн. Но, как показали советские ученые (академик Я. Б. Зельдович и его ученики), есть возможность обнаружить «черные дыры». Дело в том, что «черные дыры» должны оказывать гравитационное воздействие на окружающие их тела. Не исключено, например, что «черная дыра» может оказаться в

составе двойной звезды. Тогда присутствие «черной дыры» будет выявлено из анализа движения обычной звезды этой двойной системы. «Черные дыры» должны притягивать к себе межзвездный газ, образуя вокруг себя светящиеся ореолы, излучающие свет, рентгеновские лучи и гамма-излучение. Сейчас активно ведутся поиски «черных дыр» в Галактике. Одним из наиболее вероятных кандидатов в «черные дыры» считается невидимый источник рентгеновского излучения Лебедь X-1. Он входит в состав двойной системы (оптическая звезда-сверхгигант). Характер рентгеновского излучения и слишком большая масса этого источника (от 6 до 13 $M_\odot$) как будто бы исключают возможность того, что он представляет собой «обычную» нейтронную звезду. Дальнейшие исследования позволят окончательно выяснить природу этого рентгеновского источника.

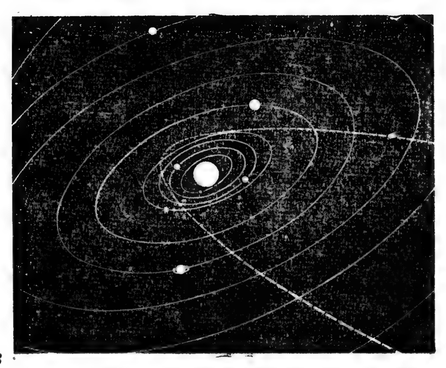
Открытие «черных дыр» — этих интереснейших объектов Вселенной, безусловно, станет одним из самых выдающихся достижений науки. Области, в которых изменяется течение времени и геометрические свойства пространства, могут представлять собой своеобразные «дыры» в пространстве и времени Вселенной. Ученые вправе надеяться, что «черные дыры» — это «двери в новую область познания мира» [1].

В звездной космогонии еще много нерешенных вопросов. От их решения зависят и успехи планетной космогонии, так как скорее всего образование звезд и планет происходит в едином процессе эволюции материи в галактиках.

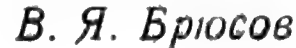
---

[1] «Черные дыры» могут возникать не только в результате эволюции звезд. Сжимающиеся массы газа, скопившегося в центральных областях шаровых скоплений и галактик, тоже могут превратиться в гигантские «черные дыры». Высказывались предположения, что такие «черные дыры» есть и в центре нашей Галактики и, например, в галактике *Центавр А* (см. фото на обложке книги).

ПЛАНЕТЫ — СПУТНИКИ ЗВЕЗД



Когда стоишь ты в звездном свете,
Смотря на небо, не забудь,
Что эти звезды, блестки эти
И те, что слиты в Млечный Путь,—
Все это — солнца огневые,
Как наше Солнце, и кругом
Плывут шары земель,— такие,
Как шар земной, где мы живем.



В. Я. Брюсов

По сравнению со звездами и галактиками, вобравшими в себя львиную часть массы космического вещества, планеты выглядят весьма скромно. Достаточно вспомнить, что масса Солнца почти в 750 раз больше массы всех планет Солнечной системы. Очевидно, и у других звезд, имеющих планеты, на долю планет приходится небольшая часть массы. Но как важны для нас планеты, одна из которых — наша Земля! Как важно для науки, а в дальнейшем и для практики человека, раскрыть многочисленные тайны космических сестер Земли!

Тысячелетиями человек следил за странными перемещениями «блуждающих светил» на фоне звездного неба. Столетия отделяют нас от первых телескопических наблюдений планет и Луны. И только первые десятилетия насчитывают «космические» исследования планет. Но, пожалуй, именно в эти годы мы узнали о планетах больше, чем за всю предыдущую историю их наблюдений. Советские станции серии «Луна», «Марс» и «Венера», а также американские лунники, «Маринеры», «Пионеры» и «Викинги» уже приоткрыли завесу над многими загадками наших ближайших соседей по космосу. Удивительным, подчас совершенно неожиданным, предстал перед нами мир каждой из планет. Подтвердились многие сведения, полученные из разнообразных наземных наблюдений. Вместе с тем появились совершенно новые данные об атмосферах и поверхностях Меркурия, Венеры, Марса и даже Юпитера. В этой главе будет рассказано о наиболее интересных и важных результатах исследования планет. Но нам бы не хотелось просто их перечислить, так как получение новых фактов о планетах не есть «конечная цель» астрономии. Науке необходимы факты для того, чтобы на их основе создать фундаментальные теории. В частности, одной из фундаментальных проблем «планетной

астрономии» была и остается проблема происхождения планетной системы. Поэтому именно с рассказа о ней начинается эта глава.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ПЛАНЕТ

Возраст Земли и других тел Солнечной системы

Определение возраста земной коры основано на исследовании радиоактивных элементов (урана, тория и др.), а также радиоактивных изотопов таких элементов, как калий, аргон, стронций, рубидий и др. Как известно, радиоактивные элементы непрерывно распадаются, причем процесс распада совершенно не зависит от внешних воздействий. При радиоактивном распаде образуются изотопы соседних элементов периодической системы Менделеева. Эти изотопы сами нередко оказываются радиоактивными, а значит, и они распадаются. Распад заканчивается, когда атомы радиоактивных элементов превращаются в нерадиоактивные атомы химических элементов и их изотопы. Например, распад урана $|^{238}U|$ завершается образованием нерадиоактивного изотопа свинца $|^{206}Pb|$.

Промежуток времени (T), по истечении которого остается половина начального количества радиоактивных атомов, характеризует скорость распада и называется периодом полураспада. Для определения возраста земной коры используются медленно распадающиеся изотопы, например ^{238}U ($T \sim 4{,}5 \cdot 10^9$ лет), радиоактивный изотоп калия ^{40}K ($T \sim 1{,}3 \cdot 10^9$ лет) и др. Чтобы определить возраст земной коры, сравнивают содержание радиоактивных элементов и продуктов их распада в многочисленных пробах, взятых для анализа. Такое сравнение показывает, что возраст земной коры около 4,5 млрд. лет. Примерно таков же возраст Земли как оформившейся планеты. К 3,5—4,5 млрд. лет близок также определенный в лабораторных условиях возраст лунных пород и метеоритов. Солнце, конечно, не может быть моложе Земли и Луны. Скорее всего возраст Солнца, желтой звезды, находящейся в средней части главной последовательности диаграммы «спектр — светимость», 5 млрд. лет.

Основные закономерности в Солнечной системе

Гипотеза о происхождении планет должна объяснить следующие основные закономерности, наблюдаемые в Солнечной системе:

1. Эксцентриситеты орбит планет очень малы.
2. Орбиты планет лежат приблизительно в одной плоскости.

3. Расстояния планет от Солнца подчиняются определенному закону.

Речь идет о давно известном астрономам эмпирическом соотношении, позволяющем приближенно вычислять расстояния планет от Солнца. Это соотношение («правило Тициуса — Боде») можно записать в виде:

$$r = 0{,}3 \cdot 2^n + 0{,}4, \qquad (30)$$

где r — среднее расстояние планеты от Солнца в а. е.

Для вычисления по этой формуле нужно принять среднее расстояние Меркурия от Солнца, равным 0,4 а. е., т. е. считать $n = -\infty$, а расстояния других планет получают при подстановке в формулу различных значений n (0 — для Венеры, *1* — для Земли, *2* — для Марса, *3* — для планеты, место которой «занимает» пояс астероидов, *4* — для Юпитера и т. д.).

4. Планеты движутся вокруг Солнца в том же направлении, в каком Солнце вращается вокруг своей оси.

5. У большинства планет направление вращения вокруг оси совпадает с направлением обращения вокруг Солнца. В этом же направлении происходит движение спутников вокруг планет.

6. В движении планет заключено 98% момента количества движений всей Солнечной системы: Солнце обладает лишь 2% момента количества движения.

В этом легко убедиться, если вычислить сумму моментов количества движения планет и сравнить ее с моментом количества движения Солнца. Момент количества движения каждой планеты равен mva, где m — масса планеты; a — среднее расстояние планеты от Солнца; v — скорость движения планеты по орбите. Момент количества движения Солнца приблизительно равен $0{,}4\,M_{\odot}v_{\odot}R_{\odot}$, где $M_{\odot}$ — масса Солнца; $v_{\odot}$ — скорость вращения Солнца на его экваторе; $R_{\odot}$ — радиус Солнца.

7. Почти 99,9% массы вещества Солнечной системы приходится на долю Солнца.

8. По своим физическим характеристикам планеты резко делятся на две группы: планеты земной группы (Земля, Меркурий, Марс, Венера и, возможно, очень мало изученный Плутон) и планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун).

Современные представления о происхождении планет

На первый взгляд может показаться, что по сравнению с грандиозными проблемами космологии и звездной космогонии проблема происхождения Солнечной системы не очень трудна. На самом деле это не так. Проблема происхождения планет — очень сложная и далеко еще не решенная проблема, во многом зависящая от развития не только астрономии, но и многих других естественных наук (прежде всего наук о Земле). Дело в том, что пока можно исследовать только единственную планетную систему, окружающую наше Солнце. Как выглядят более молодые и более старые системы, вероятно существующие вокруг других звезд, неизвестно. Чтобы правильно объяснить происхождение планет, необходимо также знать, как образовались Солнце и другие звезды, потому что планетные системы возникают вокруг звезд в результате закономерных процессов развития

материи. И все-таки, несмотря на эти трудности, ученые убеждены в том, что правильное объяснение будет найдено. Знать, как произошла наша планета, очень важно для дальнейшего развития геофизики, геохимии, геологии и других наук о Земле.

Проблемами планетной космогонии в настоящее время занимаются ученые разных стран. В формирование современной планетной космогонии значительный вклад внесли советские ученые. Так, например, на протяжении полувека проблемами планетной космогонии занимался академик В. Г. Фесенков (1889—1972), всегда подчеркивающий, что должна существовать тесная связь между процессами образования Солнца и процессами образования планет. В начале 40-х годов с космогонической гипотезой выступил известный советский ученый академик О. Ю. Шмидт (1891—1956). Ученики О. Ю. Шмидта (Б. Ю. Левин, В. С. Сафронов и др.) продолжают разрабатывать вопросы происхождения планет.

Наиболее важные выводы планетной космогонии, полученные к настоящему времени, сводятся к следующему:

1. Планеты образовались в результате объединения твердых тел и частиц, входивших в состав туманности, которая когда-то окружала Солнце. Эту туманность часто называют «допланетным» или «протопланетным» облаком. В настоящее время считается, что Солнце и протопланетное облако образовались совместно, хотя пока неясно, как произошло отделение части туманности, из которой возникли планеты, от «протосолнца».

2. Формирование планет происходило под воздействием различных физических процессов. Следствие механических процессов — сжатие (уплощение) вращающейся туманности, ее удаление от протосолнца, столкновение частиц, их укрупнение и т. д. Изменялась температура вещества туманности. Замедление вращения будущего Солнца могло быть обусловлено магнитным полем, связывающим туманность с протосолнцем. Теория, учитывающая все эти процессы, позволяет в общих чертах объяснить основные закономерности в Солнечной системе.

3. Спутники планет (а значит, и наша Луна) возникли из роя частиц, окружавших планеты, т. е. в конечном итоге тоже из вещества протопланетной туманности. Пояс астероидов возник там, где притяжение Юпитера препятствовало формированию крупной планеты (другая точка зрения, согласно которой астероиды — обломки разрушившейся планеты, сейчас имеет мало сторонников).

Таким образом, основная идея современной планетной космогонии сводится к тому, что планеты и их спутники образовались из холодных твердых тел и частиц. Земля как планета в основном сформировалась за время порядка 100 млн. лет и вначале тоже была холодной. Последующий разогрев Земли происходил в результате ударов крупных тел (таких, как астероиды), гравитационного сжатия и распада радиоактивных элементов. Не-

которое количество тепла могло выделиться и благодаря деформации земного шара лунными приливами. В прошлом Луна была в несколько раз ближе к Земле, чем сейчас, а потому лунные приливы имели значительно бо́льшие масштабы, чем сейчас.

Очевидно, таким способом планеты и спутники могли образоваться не только вблизи Солнца — рядовой звезды Вселенной, но и около любой другой звезды.

АТМОСФЕРЫ ПЛАНЕТ

Планеты, как и звезды, не всегда были такими, какими мы их застали. С течением времени менялись их атмосферы и облик поверхности. Было время, например, когда Землю окружала «первичная» атмосфера, совсем не похожая на нынешнюю. Вероятнее всего, в состав первичной атмосферы Земли входили преимущественно соединения самого распространенного во Вселенной химического элемента — водорода. Кроме водорода, водяных паров, метана и аммиака, в первичной атмосфере могли быть различные инертные газы (гелий, неон). Постепенно Земля потеряла из своей атмосферы водород и инертные газы, а имеющееся сейчас небольшое количество аргона в атмосфере Земли могло образоваться позднее в результате радиоактивного распада элементов, которые входят в состав земных пород.

Вода, углекислый газ и некоторые другие компоненты современной атмосферы находились когда-то в связанном состоянии, т. е. содержались в земных породах. В свободном состоянии эти вещества оказались в процессе формирования и разогрева земной коры, в ходе бурной вулканической активности тогда еще молодой планеты. Еще и сейчас во время извержений вулканов в атмосферу выбрасываются различные газообразные вещества. Вероятно, на самых ранних стадиях существования Земли как оформившейся планеты (около 4 млрд. лет назад) на ней возникли живые организмы (типа сине-зеленых водорослей), ставшие одним из важнейших источников обогащения атмосферы кислородом. Дальнейшая эволюция атмосферы Земли была неразрывно связана с процессами утечки в межпланетное пространство легких газов, фотодиссоциацией, вызванной солнечным излучением, и влиянием живой природы.

Какой же стала сейчас атмосфера нашей планеты? Как эволюционировали атмосферы других планет? Каковы атмосферы планет земной группы? В чем они сходны и чем отличаются от атмосферы Земли? Что представляют собой атмосферы планет-гигантов, например Юпитера? Этот параграф в какой-то мере поможет вам получить ответы на поставленные вопросы.

Атмосфера Земли

Наша планета окружена обширной, очень подвижной атмосферой, имеющей сложное строение. Приборы, поднимаемые на

воздушных шарах, геофизических ракетах и искусственных спутниках Земли, передают на Землю данные о химическом составе, температуре, давлении, плотности и других характеристиках атмосферы на разных высотах. Основными газами, входящими в состав атмосферы Земли, являются азот N_2 (78% от общего объема газа или 75,5% от общей массы газа), кислород O_2 (около 21%), аргон (1%). Других газов в атмосфере Земли очень мало, например углекислого газа CO_2 около 0,03%. Вы знаете, что кислород связан с жизнедеятельностью растений, и если бы не они, то примерно за 10 000 лет атмосферный кислород израсходовался бы на окисление горных пород.

Примерно 80% массы воздуха содержится в слоях, расположенных до высоты 15 км. В слое до 30 км находится почти 99% массы воздуха. По мере подъема над поверхностью Земли атмосфера становится все более разреженной: если на уровне моря плотность воздуха порядка 10^{-3} г/см^3, то на высоте 100 км она составляет 10^{-10} г/см^3, а на высоте 1000 км всего лишь 10^{-18} г/см^3. Резкой границы атмосфера, простирающаяся свыше 2000 км, не имеет.

Сложным образом изменяется температура земной атмосферы: в тропосфере (в средних широтах земного шара примерно до высоты 15 км) температура постепенно падает с высотой (6° С на 1 км); в нижних слоях стратосферы (примерно до 25 км) температура постоянна (примерно —55° С), а по мере подъема в верхние слои стратосферы (до 50 км) она возрастает почти до 0° С; затем снова наблюдается падение температуры в области мезосферы (50—85 км), а выше (в термосфере и экзосфере) — рост температуры до значений 800—1300° С.

Как вы знаете, в земной атмосфере под действием излучения Солнца происходит диссоциация молекул воздуха и ионизация атомов. На высоте, несколько превышающей 20 км, находится максимум плотности озоносферы — слоя озона (O_3), поглощающего значительную часть коротковолнового излучения Солнца и тем самым предохраняющего от гибели живую природу. Загрязнение атмосферы чревато разрушением озоносферы, так как озон очень чувствителен к всевозможным примесям.

Область атмосферы, где, кроме нейтральных частиц, имеется значительное количество ионов и свободных электронов, называется ионосферой. Нижние слои ионосферы возникают на высотах около 60 км, а верхние простираются примерно до 500 км.

Рассеивая и поглощая идущее из космоса излучение небесных тел, неспокойная земная атмосфера препятствует астрономическим наблюдениям. Наземные астрономические инструменты (оптические телескопы, радиотелескопы и т. д.) принимают лишь то излучение небесных тел, которое проникает сквозь «окна прозрачности» земной атмосферы.

Оптическое «окно прозрачности» пропускает видимую об-

ласть спектра (свет) и прилегающие к ней небольшие участки ультрафиолетового и инфракрасного диапазона. Все это излучение с длиной волны, большей 0,3 мкм и меньшей нескольких микрон, исследуют с поверхности Земли оптическими телескопами, которые обычно снабжают приспособлениями для фотографирования небесных тел и их спектров, например чувствительными приемниками инфракрасного излучения.

Земная атмосфера пропускает в основном радиоволны с длиной от 1 см до 20 м («радиоокно прозрачности»). Наблюдения в этом диапазоне проводятся с радиотелескопами.

Внимание ученых привлекает и диапазон субмиллиметровых волн от 500 мкм до 1 мм (участок спектра между инфракрасной областью и миллиметровыми радиоволнами). Излучение в этом диапазоне сильно поглощается водяным паром, а потому наблюдения выполняются с высотных самолетов, аэростатов и геофизических ракет.

В последние годы благодаря внеатмосферным астрономическим наблюдениям, выполняемым на орбитальных и межпланетных автоматических станциях, небесные тела исследуют во всем спектре электромагнитного излучения: от гамма- и рентгеновских лучей с длиной волны менее стомиллионной доли сантиметра до радиоволн с длиной в сотни метров и даже километра. Для сравнения интересно отметить, что глаз воспринимает излучение («видимый свет») только в пределах от 0,4 до 0,75 мкм.

Атмосфера Венеры

Эта планета окружена мощной атмосферой, которую открыл в 1761 г. М. В. Ломоносов, наблюдая прохождение планеты по диску Солнца. На протяжении многих лет о химическом составе атмосферы Венеры можно было судить только на основе данных спектральных наблюдений. Был сделан вывод, что в атмосфере Венеры есть немало углекислого газа и некоторое количество водяного пара, а также, возможно, другие газы, например кислород. Однако эти данные долгое время оставались весьма неопределенными. Ясность была внесена прежде всего благодаря непосредственным измерениям в атмосфере Венеры, которые выполнили приборы советских автоматических межпланетных станций типа «Венера». Эти станции передавали информацию во время плавного спуска на парашютах в атмосфере Венеры. А «Венера-7» не только передавала данные измерений, начиная с высоты 55 км вплоть до поверхности, но и 23 мин функционировала на поверхности планеты. Благодаря этим замечательным достижениям советской науки и техники было надежно установлено, что Венера обладает сильно разогретой атмосферой (о высокой температуре свидетельствовали и данные радиоастрономических наблюдений), в основном состоящей из углекислого газа

с незначительными примесями водяного пара, кислорода и, возможно, азота.

В месте посадки станции «Венера-7» температура атмосферы составляла 474±20° С, а давление оказалось 90±1,5 атм. Эти результаты были подтверждены и уточнены во время завершающего этапа полета «Венеры-8», спускаемый аппарат которой 22 июня 1972 г. в течение 50 мин работал на поверхности планеты и зарегистрировал температуру 470±8° С, давление 90±1,5 атм.

В общем объеме атмосферы углекислый газ составляет 97%, азот около 2% и кислород — 0,1%. Водяной пар был обнаружен в верхних слоях атмосферы. По-видимому, водяного пара в облаках Венеры существенно меньше, чем в атмосфере Земли. Такое обезвоживание атмосферы Венеры должно быть связано с тем, что Венера ближе к Солнцу, чем Земля.

Приборы, находившиеся на «Венере-8», передали сведения о некоторых оптических свойствах атмосферы и о движении воздуха в атмосфере. Так, оказалось, что, несмотря на облака, солнечный свет проникает к поверхности планеты, где все-таки наблюдалось заметное различие в освещенности ночью и днем. Атмосфера Венеры неспокойна: например, на высоте 45 км отмечены ветры, дующие со скоростью более 50 м/с.

Американский «Маринер-10» в феврале 1974 г. прошел на расстоянии 3600 км от поверхности Венеры. На Землю были переданы фотографии облачного покрова Венеры, состоящего из нескольких слоев. Получены новые данные о мощной циркуляции воздуха и подтверждено существование четырехсуточного периода циркуляции верхних слоев атмосферы: здесь ураганные ветры достигают скоростей 100 м/с и дуют в направлении вращения планеты (а оно, как вы знаете, противоположно вращению Земли и других планет). В верхней атмосфере обнаружен углерод, кислород и водород. Углерод и кислород — результат диссоциации углекислого газа. Водород и его соединения представляют собой, возможно, продукты разложения водяного пара, а быть может, и деятельности вулканов. Таковы оказались условия на Венере, которые (увы!) крайне неблагоприятны для развития каких-либо форм жизни.

Сведения, полученные в 1975 г. «Венерой-9» и «Венерой-10», подтвердили вывод о суровых условиях на Венере. Лишь на высоте 55 км от поверхности планеты температура и давление близки к привычным для нас. Освещенность поверхности в местах посадки «Венеры-9» и «Венеры-10» напоминала освещенность Земли в летний облачный день. Из-за ветров, господствующих на уровне облаков, суточные температурные контрасты, по-видимому, стираются. Облака Венеры оказались довольно однородными и прозрачными, напоминающими дымку. Скорее всего они состоят... из концентрированного водного раствора серной кислоты с примесью плавиковой и соляной кислот, а так-

же с аэрозольными составляющими, которые напоминают пылевую взвесь.

Как и у других планет земной группы, атмосфера Венеры образовалась в результате выхода вулканических газов. Вулканическая активность была особенно велика в период дифференциации вещества планеты на оболочки. Большое количество углекислого газа, которое сохранилось на Венере до настоящего времени, связано с тем, что на этой планете нет ни океана с планктоном, ни растительности на суше. Поэтому поглощать там углекислый газ могут лишь минералы поверхности. В атмосфере Венеры очень мало водяного пара. Пока трудно понять, куда исчезла вода и было ли ее вообще когда-нибудь много.

Важно подчеркнуть, что новые сведения, полученные благодаря непосредственным измерениям, подтвердили и уточнили результаты, которые ранее были получены с помощью оптических и радиоастрономических методов.

Сравните химический состав атмосфер Земли и Венеры.

На каких примерно глубинах в океанах Земли давление такое же, как на поверхности Венеры?

Плотность газа у поверхности Венеры примерно в 65 раз больше, чем у поверхности Земли. Оцените, во сколько раз она меньше плотности воды.

Высокую температуру у поверхности Венеры многие исследователи этой планеты пытаются объяснить парниковым эффектом, сущность которого сводится к следующему: атмосфера Венеры, состоящая в основном из углекислого газа, ослабляя лучи Солнца, пропускает их к поверхности планеты. Нагретая поверхность сама становится источником инфракрасного излучения. Значительная часть этого излучения поглощается в атмосфере планеты и не проникает в межпланетное пространство. Благодаря этому равновесие между теплом, которое получает планета от Солнца, и теплом, излучаемым ею, достигается при более высокой температуре.

Атмосфера Марса

В настоящее время, благодаря успешным экспериментам, проведенным с помощью советских и американских космических аппаратов, обнаружен ряд существенных отличий атмосферы Марса от атмосфер Земли и Венеры. Прежде всего, общее количество газа в марсианской атмосфере примерно в 100 раз меньше, чем в земной. Даже в областях, где атмосферное давление на Марсе наибольшее (в районе 65° с. ш.), оно не превышает 7 мм рт. ст. Такое давление существует на высоте около 35 км над поверхностью Земли... Ветры, скорость которых порой достигает нескольких десятков метров в секунду, способны поднять во время бурь в разреженную атмосферу Марса на несколько километров более миллиарда тонн пыли. Это составляет сотые доли процента от общей массы атмосферы. Причина циркуляции

воздуха и возникновения сильных ветров — неравномерный разогрев поверхности и атмосферы Марса.

Как и атмосфера Венеры, «воздух» Марса состоит в основном из углекислого газа. Это стало известно в 1974 г. благодаря газоанализатору, установленному на «Марсе-6», и данным американских «Викингов» (1976 г.).

Кроме углекислого газа, в атмосфере Марса в небольшом количестве содержатся кислород, озон, аргон и водяной пар, причем количество водяного пара не остается постоянным.

Хотя в атмосфере Марса много углекислого газа, там, вероятно, существенную роль играет не парниковый, а «антипарниковый» эффект. Пыль, поднимаемая в воздух во время бурь, отражает и поглощает значительную часть солнечного излучения. Вместе с тем ни она, ни углекислый газ в очень разреженной атмосфере Марса не становятся препятствием для теплового излучения, исходящего от нагретой поверхности планеты. В результате поверхность планеты быстро охлаждается (не только по сравнению с поверхностью Венеры, но даже и Земли).

Много раз делались попытки построить «модель» атмосферы Марса, т. е. зависимость температуры, плотности, давления и химического состава от высоты. Однако теперь в связи с получением новых данных о Марсе старые «модели» будут, по-видимому, существенно усовершенствоваться.

Важное значение имеет вопрос об ионосфере Марса. Исследования, выполненные на «Марсе-5», показывают, что электронная концентрация в атмосфере Марса такова, что там космонавты, вероятно, сумеют общаться с помощью радиосвязи (на волнах длиннее 500—1000 м).

Атмосфера Меркурия

В последнее время появились некоторые сведения об атмосфере этой планеты. Маленький и близко расположенный к Солнцу Меркурий имеет, по данным «Маринера-10», очень разреженную атмосферу, в которой обнаружены некоторые инертные газы, например аргон и неон. Такие газы могли выделиться в результате распада радиоактивных элементов, входящих в состав грунта планеты.

Концентрация газа в атмосфере Меркурия примерно в 10^{11} раз меньше, чем в земной. Сколько же частиц в среднем содержится там в 1 см^3?

Теперь давайте перейдем от едва уловимой атмосферы этой крошечной планеты к атмосферам самых далеких больших планет Солнечной системы.

Атмосфера Юпитера

Планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун) окружены протяженными и очень непрозрачными атмосферами, а потому наблюдениям доступны лишь самые внешние зоны атмосфер этих планет. В исследовании атмосфер планет-гигантов множе-

ство нерешенных вопросов. Это относится и к Юпитеру, который исследован лучше, чем другие далекие планеты. При наблюдении в телескоп заметно сжатие Юпитера. Оно равно $^1/_{16}$, значительно превосходит сжатие любой планеты земной группы и вызвано быстрым вращением Юпитера вокруг оси: период вращения экваториальной зоны планеты составляет всего лишь $9^ч50^м,5$. Юпитер вращается не как твердое тело: период экваториальной зоны на несколько минут меньше периода вращения средних широт и околополярных областей. Это объясняется тем, что мы наблюдаем вращение внешних слоев очень мощной атмосферы планеты. В телескоп заметны полосы, расположенные параллельно экватору Юпитера. С течением времени иногда довольно быстро изменяется ширина облачных полос, их удаление от экватора планеты, яркость и цвет. Возможно, что эти активные процессы, происходящие в атмосфере планеты, зарождаются в глубоких внутренних и пока еще совершенно недоступных наблюдениям областях Юпитера. Природа этих процессов загадочна, характер их отличен от тех, которые происходят на Земле.

На протяжении около 300 лет на Юпитере наблюдается Красное Пятно. Оно очень устойчиво, имеет эллипсоидальную форму (большая ось эллипса превосходит диаметр Земли!). Пока не известно, является ли Красное Пятно «плавающим островом» в атмосфере планеты или так мы видим газовый столб, который связывает Пятно с какой-нибудь неровностью поверхности планеты. Впрочем, нет уверенности, что Юпитер имеет твердую поверхность!

Химический состав атмосферы Юпитера резко отличается от современного состава атмосфер планет земной группы и напоминает их первичные атмосферы. Как показывают спектральные наблюдения, в атмосфере Юпитера содержится молекулярный водород H_2, метан CH_4 и аммиак NH_3. Из других газов наиболее распространенным должен быть в атмосфере Юпитера, как следует из расчетов, гелий. Эти расчеты подтвердились, когда «Пионер-10» (США) после 641 суток полета 4 декабря 1973 г. прошел на расстоянии 130 тыс. км от Юпитера. Во время этого эксперимента в атмосфере Юпитера был действительно обнаружен гелий, которого, однако, меньше, чем водорода. С борта космического корабля получены фотографии планеты в синих и красных лучах спектра. Сфотографированы и некоторые спутники Юпитера (Ио, Каллисто, Европа, Ганимед), причем у двух из них (Ио и Ганимед) оказались атмосферы[1]. Измерение

[1] В 1974 г. открыт тринадцатый спутник Юпитера, а в 1975 г. — четырнадцатый! Напомним, что десятый спутник Сатурна был открыт в 1966 г. Это еще три очень наглядных примера того, как в наше время происходит дальнейшее накопление сведений о строении Солнечной системы.

Четырнадцатый спутник Юпитера 21^m — самый слабый спутник из всех известных в Солнечной системе. Этот спутник находится от Юпитера на расстоянии почти 11 млн. км.

температуры облачного слоя в основном подтвердило известный из наземных наблюдений результат: количество тепла, которое Юпитер испускает, более чем вдвое превышает тепловую энергию, которую планета получает от Солнца. Возможно, что идущее из недр планеты тепло выделяется в процессе медленного сжатия гигантской планеты (1 мм в год!).

В 1955 г. было открыто радиоизлучение Юпитера. Оно состоит из интенсивных всплесков, наблюдающихся в диапазоне волн длиннее 15 м. Природа этого очень мощного радиоизлучения, связанного с процессами в атмосфере Юпитера, пока неизвестна. В диапазоне сантиметровых волн наблюдается более постоянное радиоизлучение, которое может быть объяснено излучением электронов высоких энергий, движущихся в обширном радиационном поясе планеты. Радиоизлучение с длиной волны 3 см имеет в основном тепловую природу.

ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ И ПЛАНЕТ

«Поверхность» в буквальном смысле этого слова имеет не каждое небесное тело. Нельзя, например, считать поверхностью фотосферы Солнца и других звезд (исключая нейтронные звезды!). До сих пор неизвестно, есть ли твердая поверхность у планет-гигантов...

Поверхность нашей собственной планеты, ее материки и океаны, вам хорошо знакома из курса физической географии. Поверхности других планет земной группы очень отличаются от поверхности Земли и скорее напоминают поверхность Луны. Вот почему перед тем, как познакомиться с поверхностями планет земной группы, необходимо вспомнить главное о поверхности Луны (тем более, что последнюю вы сумеете потом детально изучить с помощью школьного телескопа или даже бинокля!).

Поверхность Луны

Основные детали лунного рельефа. Даже невооруженным глазом на Луне видны обширные темные участки («моря») и светлые («материки»). Несмотря на то что в лунных морях нет ни капли воды, в науке сохранилась прежняя система наименований, предложенная еще в XVII в. В отличие от морей, материки представляют собой гористые районы. С названиями некоторых морей и материков вы уже давно знакомы хотя бы потому, что эти названия часто встречаются в связи с полетами на Луну.

На обращенной к Земле стороне Луны материки занимают около 60%, а моря — 40%.

Очень своеобразны многочисленные кольцевые горы на Луне — кратеры. Обычно небольшой лунный кратер имеет следующее строение: замкнутый вал, опоясывающий дно, и цент-

ральная горка. Диаметры отдельных кратеров достигают 250 км при высоте вала в 5 км.

Начертите в масштабе профиль лунного кратера.

Многие лунные моря окаймлены протяженными горными хребтами. Хребты получили названия земных горных цепей (Кавказ, Альпы, Пиренеи и др.).

Видимая сторона Луны. Отсутствие атмосферы на Луне позволяет подробно рассмотреть лунную поверхность. Неизгладимое впечатление оставляет красота лунного рельефа у наблюдателя, который имеет в своем распоряжении небольшой телескоп или хотя бы призменный бинокль. В полнолуние особенно хорошо видны моря, а кратеры наиболее отчетливо выделяются вблизи терминатора, постепенно перемещающегося при смене лунных фаз. Обязательно постарайтесь увидеть на Луне те детали, о которых будет сказано ниже и которые вы без труда найдете на карте Луны.

Через три дня после новолуния («возраст» Луны — три дня) терминатор проходит через Море Кризисов по окраинам Моря Изобилия.

В сентябре 1970 г. советская автоматическая станция «Луна-16» доставила на Землю лунный грунт. Несколько позднее грунт был доставлен и станцией «Луна-20», которая побывала в материковом районе, отстоящем от места посадки «Луны-16» на 120 км.

В школьный телескоп можно рассмотреть горные валы, окаймляющие Море Кризисов, а также ряд крупных кратеров (Лангрен, Венделин и др.).

Из Моря Кризисов в августе 1976 г. «Луна-24» доставила на Землю лунный грунт.

При «возрасте» Луны в шесть дней отчетливо видны Море Нектара, Море Спокойствия и Море Ясности, кратеры Теофил, Кирилл и Катарина.

В Море Спокойствия было выбрано место для первой посадки на Луну корабля с космонавтами на борту. В восточной окраине Моря Ясности на протяжении нескольких месяцев работал «Луноход-2» (1973 г.).

В день первой четверти (возраст семь дней) терминатор проходит через множество кратеров: хорошо виден и лунный Кавказ.

В районе кратеров Аристилл, Автолик и Архимед (Залив Лунника) впервые в истории прилунилась «Луна-2».

При «возрасте» Луны в десять дней вы увидите обширное Море Дождей, Море Холода, горные хребты Апеннины, Альпы, а также много крупных кратеров (Коперник, Птолемей, Альфонс, Арзахель, Клавий, Тихо).

В Море Дождей работал «Луноход-1», доставленный на Луну в конце 1971 г.

При «возрасте» Луны в двенадцать дней уже видна значительная часть крупнейшей лунной равнины — Океана Бурь. Отчетливо выделяются кратеры Аристарх и Кеплер.

Во время полнолуния в западной части Океана Бурь виден район, в котором была совершена первая мягкая посадка автоматической станции на Луну («Луна-9»). Обратите внимание на светлые лучи, тянущиеся от кратеров Тихо, Коперник, Кеплер, Аристарх.

В самые большие телескопы с Земли редко удается рассмотреть на Луне детали размером менее километра. Но еще до первых полетов людей на Луну автоматические станции передали на Землю фотографии, полученные с небольшой высоты над поверхностью Луны и даже с ее поверхности. Эти фотографии позволили начать изучение микрорельефа Луны, т. е. множества мелких кратеров на лунных морях или на дне больших кратеров, небольших камней и т. д. Из неразличимых с Земли кратеров состоят и светлые лучи.

Данные космических экспериментов о пористости и неровностях микрорельефа Луны подтвердили выводы, которые многие советские и зарубежные ученые сделали ранее на основе наземных наблюдений.

Лунные породы. Благодаря мягким посадкам автоматических станций на Луну, а затем и полетам людей мы узнали механические свойства лунного грунта и его химический состав. На Луне не оказалось толстого слоя пыли, которого еще недавно опасались многие ученые. Но пыль на Луне есть. Она черно-сероватого цвета и по внешнему виду напоминает древесный уголь. Пылью покрыты лунные камни, она легко прилипала к подошвам обуви и скафандрам космонавтов. Но ее слой очень тонкий: ноги космонавтов углублялись только на несколько миллиметров, а уже на глубине 3 см очень твердые породы. Образцы лунных пород внешне напоминают земные изверженные базальты. В состав их входят хорошо известные на Земле химические элементы (Si, Al, Fe, Ca, Mg и др.). Но в лунных породах больше, чем в земных, содержится тугоплавких элементов (Ti, Zr, Cr и др.), а меньше — легкоплавких (Pb, Na, K и др.). Химический состав различных участков поверхности Луны неодинаков (например, базальты Океана Бурь содержат более 10% окиси титана, а в Море Изобилия не менее 1%).

В поверхностном слое Луны (реголите) содержатся осколки магматических пород, шлакообразные частицы с оплавленными гранями. Многие образцы как бы обработаны песком. Их облик свидетельствует о том, что они длительное время подвергались сложным процессам эрозии (удары мелких метеоритов; обработка пород потоками частиц, непрерывно исходящими от Солнца), не похожим на те, к которым мы привыкли на Земле.

На Луне не обнаружено никаких микроорганизмов.

В лунных породах не найдено кристаллизационной воды, а это

значит, что воды на Луне нет не только сейчас, но ее не было и в период формирования Луны как небесного тела. Необычными для Земли оказались и стекловидные частицы на дне некоторых кратеров. Они, сверкая подобно маленьким зеркалам, привлекали внимание космонавтов.

Лунные породы, как уже упоминалось, относятся к очень древним.

Обратная сторона Луны. В отличие от продолжающихся уже несколько столетий телескопических исследований видимой стороны Луны, исследование обратной ее стороны началось буквально на наших глазах.

Впервые в истории науки обратная сторона Луны была сфотографирована советской автоматической станцией «Луна-3» 7 октября 1959 г. Примерно через 6 лет (июль 1965 г.) советская автоматическая межпланетная станция «Зонд-3», выведенная на гелиоцентрическую орбиту, передала на Землю новые фотографии. При этом удалось сфотографировать почти все объекты обратной стороны Луны, которые не попали в поле зрения фототелевизионных устройств «Луны-3». Все эти эксперименты позволили советским ученым составить первую карту и атлас обратной стороны Луны, первый лунный глобус, а также первую полную карту, охватывающую почти всю поверхность Луны.

На невидимом полушарии преобладают материки. Средний диаметр наиболее крупного моря — Моря Москвы — достигает 300 км.

На обратной стороне Луны обнаружено много кратеров (Ломоносов, Джордано Бруно, Циолковский, Жолио Кюри, Королев и др.). Нередко кратеры образуют длинные цепочки, тянущиеся на сотни километров.

Поверхность Меркурия

Меркурий из-за близости к Солнцу — труднодоступная для наблюдений планета. Поэтому, хотя и существовали карты этой планеты, наземные наблюдения Меркурия не давали ясного представления о его поверхности. Весной 1974 г. «Маринер-10» прошел вблизи Меркурия и передал на Землю первые фотографии. Оказалось, что поверхность Меркурия очень похожа на поверхность Луны. Она покрыта множеством кратеров, отличающихся, подобно лунным, резкими очертаниями, не сглаженными эрозией. Как и на Луне, часть кратеров Меркурия имеет плоское дно, у других в центре возвышается гора («центральная горка»). Диаметры обнаруженных кратеров от нескольких сот метров до 120 км. На фотографиях видны светлые лучи, идущие от некоторых кратеров. Еще в 1947 г. советские ученые В. В. Федынский и К. П. Станюкович предсказали, что на Меркурии должны быть кратеры, возникшие в результате падения метеоритов. И вот, спустя более четверти века, кратеры на Меркурии были открыты. В сентябре 1974 г. «Маринер-10» вторично прошел вблизи

Меркурия (на минимальном расстоянии около 50 000 км). На фотографиях планеты, охватывающих почти 40% ее поверхности, видны многочисленные кратеры и участки, где кратеров мало. Различие в силе тяжести на Луне и Меркурии сказалось на особенностях строения меркурианских кратеров. Они, во-первых, оказались менее глубокие, чем лунные. Во-вторых, во многих кратерах с диаметром более 14 км имеются центральные горки (на Луне мы встречаем их в кратерах, диаметры которых превышают 50 км). В-третьих, чаще, чем на Луне, встречаются концентрические и двойные кратеры. Кроме того, на сотни километров через кратерные и межкратерные области на Меркурии тянутся, извиваясь, удивительные гигантские уступы, возвышающиеся до 3 км. Вероятно, на Меркурии, как и на Луне, есть кратеры метеоритного и вулканического происхождения. Очевидно, что детали рельефа Меркурия должны без значительных изменений сохраняться более продолжительное время, чем на Марсе.

Поверхность Венеры

О поверхности Венеры, окутанной облаками, известно пока еще немного. Правда, радиолокационные наземные наблюдения выявили неровности поверхности и даже позволили составить карты планеты. По-видимому, на Венере (особенно в ее экваториальной области) много кратеров, похожих на лунные. Диаметр наибольшего из обнаруженных кратеров достигает 160 км. Ученые отмечают, что на Венере неглубокие кратеры: глубина самого большого не более 400 м.

Начертите в масштабе профиль этого кратера и сравните с профилем большого лунного кратера (с. 99).

Гамма-спектрометр, установленный на спускаемом аппарате станции «Венера-8», позволил измерить радиоактивность пород планеты. Оказалось, что в них больше радиоактивных элементов, чем в коре и мантии Земли. Основываясь на этом, советские исследователи Венеры предполагают, что в месте посадки станции поверхность планеты сложена породами, напоминающими земные граниты.

В октябре 1975 г. советские автоматические межпланетные станции «Венера-9» и «Венера-10» совершили мягкую посадку на поверхность Венеры в районах, отстоящих друг от друга на 2000 км. Удалось сфотографировать и передать на Землю первые панорамы поверхности загадочной планеты. Перед глазами исследователей предстала каменистая пустыня со скальными образованиями (возможно, выходами магматических пород), множество камней (возможно, следствие разломов верхних слоев), на панорамах заметны отложения мелкого фрагментированного материала (возможно, результат эрозии). Средняя плотность пород около 2,7 г/см^3 (близка к земным базальтам),

средняя плотность пород всей планеты 5,27 г/см^3. Свежие разломы — свидетельство тектонической активности. В целом фигура планеты более гладкая, чем у Земли. Микрорельеф Венеры более сглажен по сравнению с Луной.

Таковы пока самые первые результаты, которые, несмотря на огромные трудности, все-таки удалось получить о поверхности Венеры.

Поверхность Марса

Красноватые светлые области («материки»), похожие на пустыни, занимают $^2/_3$ планеты. Когда-то пугавший суеверных людей красноватый цвет Марса, скорее всего, объясняется цветом веществ (например, гидратов окислов железа), входящих в состав наружного покрова планеты. Вблизи полюсов в телескоп видны полярные шапки, площадь которых заметно уменьшается весной и летом. Вы знаете, что воды на Марсе очень мало: безводны темные области планеты («моря»), пока неизвестно, сколько воды в полярных шапках (вспомните, что толщина ледового покрова Антарктиды достигает нескольких километров) и как велик на Марсе слой льда под верхним покровом (слой вечной мерзлоты).

Давно известны сезонные изменения контраста и границ марсианских морей. Одна из гипотез связывает его с сезонными изменениями растительного покрова (хотя в настоящее время нет бесспорных данных о наличии каких-либо растений на Марсе). Другая гипотеза объясняет наблюдаемые изменения отложением и перемещением мелкой пыли. Вы уже знаете, что огромные массы пыли поднимаются в атмосферу планеты во время бурь, которые нередко мешают рассматривать поверхность планеты с Земли, а в конце 1971 г. грандиозная буря (сильнейшая за последнее столетие) очень помешала исследованиям и экспериментам на станциях «Марс-3» и «Маринер-9».

Неожиданностью для исследователей Марса явилось открытие на нем множества кратеров, напоминающих лунные. На снимках, переданных на Землю с борта американских станций «Маринер» (1965—1972 гг.) и советских «Марс» (1971—1974 гг.), видны и небольшие, и очень крупные кратеры (сотни километров в диаметре!). Использовавшиеся при фотографировании телеобъективы позволили выделить детали поверхности размером в сотни метров, т. е. можно было «увидеть» крупные архитектурные сооружения, если бы остатки их находились на Марсе и попали в поле зрения камеры...

Детальное исследование марсианского рельефа показывает, что он имеет не только сходство, но и большие различия с лунным. Марсианские кратеры, в отличие от кратеров Луны и Меркурия, длительное время подвергались сильной ветровой эрозии. На Марсе не видно кратеров с системами лучей, а на Луне нет областей, подобных марсианской Элладе — круглой пустынной

области (диаметр этого «бассейна» около 1600 км), совершенно лишенной заметных кратеров.

Кратеры были обнаружены не только на поверхности Марса, но и на его спутниках. Фобос и Деймос — каменистые глыбы, буквально изрытые кратерами. На спутниках Марса нет атмосферы. Поэтому ветровая эрозия, разрушившая марсианские кратеры, не влияла на кратеры, находящиеся на его спутниках.

Кратеры не единственный показатель неровности марсианской поверхности: радиолокационные и спектроскопические наблюдения показывают, что на Марсе существуют протяженные возвышенности и низины, относительные высоты которых в среднем составляют 10—15 км. Перепады высот на Луне около 10 км, а на Земле — около 20 км (такова разность высот между вершиной Джомолунгмы и Филиппинской впадиной).

Один из самых возвышенных районов Марса — Тарсис. Здесь обнаружено несколько больших высокогорных кратеров. В этом районе «Маринер-9» сфотографировал жерла нескольких вулканов (кальдер). Самая большая кальдера — Олимпийские снега (ее название связано с тем, что с Земли она видна как светлое образование) — имеет в диаметре около 65 км. Предполагается, что диаметр основания горы около 500 км (!), высота вулкана не менее 15 км (но может оказаться в 1,5—2 раза больше). Величественные кальдеры находятся и на Земле, например на Гавайских островах вершины подводных вулканов поднимаются более чем на 4 км над уровнем Тихого океана. Но таких гигантских гор, как на Марсе, нет ни на Земле, ни на Луне. Хотя никаких признаков современной вулканической активности на Марсе не обнаружено, предполагают, что в геологическом масштабе времени марсианские вулканы довольно молоды — их возраст десятки или сотни миллионов лет.

Сто лет назад на Марсе была открыта сетка тонких и длинных линий, получивших название «каналов». И почти сто лет продолжался спор об их природе. Некоторые исследователи считали, что каналы созданы разумными существами для ирригационных целей... Но на снимках, переданных с космических аппаратов, никаких каналов не оказалось. Зато четко видны «рифтовые долины» и «русла рек». Представьте себе, например, гигантскую трещину, простирающуюся на тысячи километров и имеющую ширину около ста километров и глубину более 5 км. А ведь именно такова на Марсе рифтовая долина (Копрат), тянущаяся с востока на запад почти на 80° марсианской долготы! «Русла рек» в виде извилистых углублений с «притоками» обнаружены на многочисленных снимках, переданных в 1972 г. «Маринером-9» и в 1974 г.— «Марсом-5». Одно из самых больших образований такого рода — Ниргал возникло давно, возможно, миллиард лет назад, т. е. оно в 10 раз старше Индийского океана на Земле. Другие «русла» могут быть значительно моложе, а значит, не исключено, что в геологически обозримые периоды

на Марсе существовали реки. Если дальнейшие исследования Марса подтвердят гипотезы о «молодых» вулканах и руслах бывших рек, то это будет означать, что сравнительно «недавно» Марс был не таким, как сегодня. Вместе с тем новые открытия поставили новые вопросы. Например, неясно, почему сохранились довольно «свежие» русла, каков был климат на Марсе раньше, и если он был иным (во время «настоящих рек»), то почему изменился, и т. д.

ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ И МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ПЛАНЕТ

Земля

С исследованием внутреннего строения Земли связаны проблемы прогноза катастрофических землетрясений и извержений вулканов, изучения закономерностей поднятия и опускания огромных участков земной коры, выяснения причин и условий образования полезных ископаемых и т. д.

Пока лишь проектируется бурение на материках скважин глубиной 10—15 км. Осуществление этих проектов даст новые сведения о свойствах вещества земной коры. Однако для исследования всей толщи земной коры еще многие годы будут применяться косвенные геофизические методы. Наиболее важный из них — сейсмический. Пользуясь им, геофизики изучают свойства вещества на любых глубинах. Для этого в разных точках земной поверхности регистрируют скорость распространения внутри Земли волн, вызванных землетрясениями или мощными искусственными подземными взрывами. Есть у геофизиков и другие методы, рассказ о которых выходит за рамки этой книги. Наконец, большие надежды возлагаются и на то, что исследование недр разных планет Солнечной системы позволит нам лучше узнать собственную Землю.

Напомним самые важные сведения о строении Земли и ее магнитного поля. Средняя толщина земной коры на материках равна 35 км. Значительно тоньше кора под океанами. Под корой, содержащей до 1% всей массы земного шара, до глубины 2900 км простирается мантия Земли. В основном вещество в коре и мантии находится в твердом состоянии (в нем распространяются поперечные волны). Плотность самых верхних слоев Земли около 3 г/см^3, т. е. почти вдвое меньше ее средней плотности (5,5 г/см^3). С глубиной плотность возрастает, достигая вблизи центра Земли 14—18 г/см^3.

Глубже 2900 км поперечные волны не проникают. Здесь граница земного ядра. Вещество ядра находится в необычном состоянии: под действием давления в миллион атмосфер оно даже во внешних слоях приобрело плотность около 9 г/см^3, его температура не ниже 4000 К (в центре Земли около 10 000 К), но

при этом вещество ядра подобно жидкой среде не пропускает поперечные волны. Масса ядра составляет около 32% от всей массы нашей планеты.

Общая конфигурация магнитного поля Земли напоминает поле диполя, ось которого составляет 11,4° с осью вращения нашей планеты. В отдельных местах Земли, как вы знаете, существуют области повышенной напряженности (магнитные аномалии).

Природа общего магнитного поля Земли пока еще не очень ясна. Предполагается, что магнитное поле связано с существованием проводящего ядра Земли, в котором происходит непрерывное движение вещества. Причины такого движения различны: например, тепловая и гравитационная конвекция, суточное вращение и т. д. В движущейся проводящей жидкости, как и во всяком движущемся проводнике, возникает ток при пересечении силовых линий магнитного поля. Для этого достаточно даже незначительного («затравочного») магнитного поля. Появившийся ток порождает свое магнитное поле, которое при определенных условиях может усилить «затравочное». Но тогда, естественно, возрастет ток в проводящей жидкости и будет увеличиваться его магнитное поле. Подобный процесс («гидромагнитное динамо» или «динамо-механизм») не может бесконечно увеличивать магнитное поле. Как и в широко используемых в технике электрических машинах (динамо-машины с самовозбуждением), в «планетарном динамо» рост магнитного поля будет продолжаться, пока не возникнет некоторое стационарное магнитное поле, т. е. магнитное поле Земли. Если такая гипотеза верна, то магнитные поля должны быть у всех планет, которые достаточно быстро вращаются вокруг своих осей и в недрах которых есть проводящая жидкость — «ротор» планетарной электрической машины.

В 1958 г. приборы, установленные на первых советских и американских спутниках Земли и космических ракетах, позволили обнаружить далеко за пределами ионосферы область околоземного пространства, в которой движутся электрически заряженные частицы. Это радиационный пояс Земли — зона, где удерживаются захваченные магнитным полем Земли электроны и протоны. Энергии этих частиц значительно больше энергии теплового движения частиц ионосферы. Поэтому частицы радиационного пояса представляют опасность для полетов космонавтов.

Луна и планеты земной группы

О внутреннем строении других планет земной группы (а также и Луны) известно, конечно, меньше, чем о недрах нашей собственной планеты, длительное время изучаемой разнообразными методами. Это связано не столько с тем, что планеты «далеки» от нас (звезды находятся несоизмеримо дальше, но, одна-

ко, мы знаем об их внутреннем строении!), сколько с тем, что вещество в недрах планет земной группы находится в состоянии более сложном, чем в звездах. Основываясь на уже известных нам представлениях о происхождении планет, астрономических данных (размеры, массы, моменты инерции планет, сведения о химическом составе метеоритов и др.), а также данных геофизики и физики, ученые пытаются создавать модели внутреннего строения планет.

Так, например, согласно модели, разработанной в Институте физики Земли АН СССР С. В. Козловской, Марс, подобно Земле, имеет кору, мантию и ядро. Толщина коры не менее 20 км, а ее масса около 6% массы планеты. Почти такова же масса ядра (радиус которого около 1000 км). Значит, на долю мантии приходится почти 89% массы Марса. Поскольку масса Марса составляет лишь 0,1 массы Земли, то в недрах Марса температура и давление меньше, чем в недрах Земли. Например, давление в центре Марса соответствует давлению внутри Земли на глубине 800 км. В данной модели предполагается, что ядро Марса состоит из никелистого железа. Если же в ядре содержатся в достаточном количестве другие элементы, например сера, то плотность его меньше, чем плотность «железного» ядра, и модель будет несколько отличаться от той, с которой мы только что познакомились. Предстоящие сейсмические исследования Марса позволят получить сведения, необходимые для уточнения модели его внутреннего строения.

Как известно, на Луне первые сейсмические исследования уже проводились. Они, в частности, позволили установить, что толщина коры (в Океане Бурь) достигает 65 км, т. е. значительно превышает толщину земной коры. Ученые считают, что для образования такой коры необходимо было расплавление всей Луны, а не только ее верхнего слоя. Эти и ряд других новых данных о Луне свидетельствуют о том, что либо Луна образовалась горячей, либо очень быстро нагрелась в процессе своей эволюции. Кора образована из пород, плотность которых около 3 г/см^3. Глубже располагается мантия, плотность пород которой ближе к средней плотности Луны (3,3 г/см^3). На глубине 1000 км от поверхности Луны находится зона «лунотрясений» — переходная зона между мантией и частично расплавленным ядром, радиусом 200—300 км. Вывод о том, что недра Луны имеют высокую температуру, советские радиоастрономы во главе с членом-корреспондентом АН СССР В. С. Троицким сделали задолго до первых сейсмических экспериментов на Луне.

Общее магнитное поле, подобное дипольному полю Земли, у Луны не обнаружено, но ряд экспериментов, включая данные, полученные с помощью советских луноходов, свидетельствуют о намагниченности лунных горных пород. Возможно, что в прошлом Луна обладала довольно сильным магнитным полем.

Данные наблюдений и расчетов позволяют построить пред-

варительные модели и других планет земной группы. Так, например, полагая, что поверхностный слой меркурианских морей напоминает по плотности лунный реголит, и зная, что средняя плотность Меркурия значительно выше лунной (5,44 г/см^3), ученые высказывают гипотезу о том, что эта планета имеет мощную силикатную оболочку (500—600 км), а оставшиеся 50% объема занимает железное ядро.

В отличие от Луны, Меркурий имеет общее магнитное поле, напряженность которого меньше, чем у Земли, и больше, чем у Марса. Возможно, что природа магнетизма Меркурия отличается от происхождения магнитного поля нашей планеты, поскольку Меркурий очень медленно вращается вокруг своей оси, уступая в этом одной лишь Венере. Межпланетное магнитное поле, взаимодействуя с ядром Меркурия, может создать в нем электрические токи. Эти токи, а также перемещение зарядов в имеющейся у Меркурия ионосфере (слабой по сравнению с Землей), могут поддерживать магнитное поле планеты. Последнее, взаимодействуя с солнечным ветром, создает магнитосферу.

Анализ данных, полученных с помощью магнитометров, находящихся на борту «Марса-2» и «Марса-3», позволил советским ученым во главе с Ш. Ш. Долгиновым сделать предварительный вывод о существовании дипольного магнитного поля Марса. Это поле примерно в 500 раз слабее земного, что, вероятно, прежде всего, связано со сравнительно небольшим размером ядра Марса.

Планеты-гиганты

Наверное, самым большим и сложным (т. е. не только дипольным) магнитным полем обладает Юпитер. Диполь Юпитера противоположен земному: северный магнитный полюс находится в северном полушарии планеты. Ось диполя составляет почти такой же наклон с осью вращения, как и у Земли. Центры обоих диполей смещены по отношению к центрам планет. Напряженность поля Юпитера достигает 4 э (по данным «Пионера-10»), т. е. в несколько раз превышает напряженность поля Земли.

Радиационные пояса планеты «Пионер-10» «почувствовал» еще на расстоянии 8 млн. км от нее. Радиационные пояса Юпитера более сжаты, чем земные, а по интенсивности они в тысячи раз превосходят пояса радиации Земли.

Уникальна магнитосфера Юпитера (рис. 18). В частности, поражают ее размеры, в 100 раз превосходящие размеры магнитосферы Земли. Четыре ближайших к планете спутника движутся внутри магнитосферы Юпитера, взаимодействуя с ней. Электроны, ускоренные в магнитосфере Юпитера, проникают даже в область орбиты Земли.

Радиационные пояса и магнитные поля у других планет-гигантов обнаружить не удалось, хотя внутреннее строение и ско-

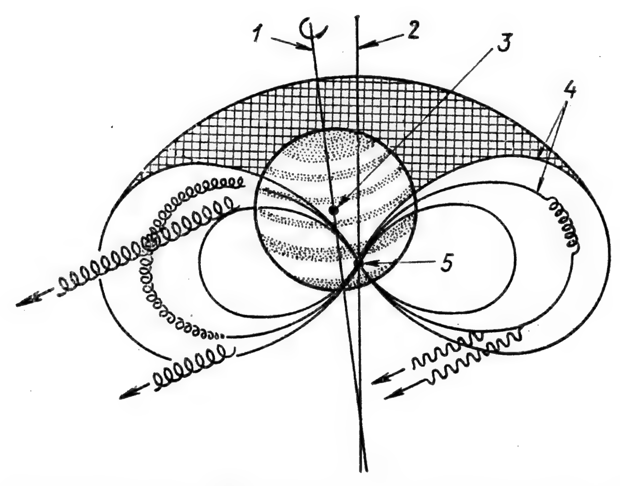


Рис. 18. Магнитосфера и радиационные пояса Юпитера: *1* — ось вращения; *2* — магнитная ось; *3* — центр масс; *4* — силовые линии дипольного поля; *5* — магнитный центр.

рость вращения такой планеты, как Сатурн, очень напоминает Юпитер.

Как же устроен Юпитер? Что скрывается под его облачными слоями? Юпитер излучает больше тепла, чем получает; температура в его недрах должна быть, как показывают расчеты, более 10 000 К. Так как масса Юпитера в 318 раз превышает массу Земли, то в недрах должны господствовать огромные давления. Поскольку в состав планет-гигантов в большом количестве входит водород, то важно знать его свойства при больших давлениях и температурах. Экспериментальные исследования водорода, подвергнутого в лабораториях действию давлений в миллион атмосфер, а также теоретическое рассмотрение выявляет необычные свойства обычного водорода. Например, сжимая газообразный водород при комнатной температуре, можно получить жидкий водород. При давлении 3 млн. атм водород становится твердым веществом, обладающим свойствами металла (блеск, электропроводность, ковкость). При давлениях, превышающих 100 млн. атм, водород из твердого металлического превращается в жидкий металлический. Как в твердом, так и в жидком металлическом водороде электроны не связаны с ядрами атомов, а свободно движутся подобно свободным электронам в обычных металлах.

Предположив, что Юпитер содержит 60% водорода (по массе) и почти 40% гелия, советский ученый В. П. Трубицын построил следующую модель Юпитера. По мере продвижения от границы облачного слоя в глубину растут давление и температура и постепенно вещество из газообразного состояния пере-

ходит в жидкое. На глубине 15 000 км (0,2 радиуса Юпитера), где давление 3 млн. атм и температура около 10 000 К, появляется расплавленный металлический водород. Вихревые движения в этом веществе могут быть источником магнитного поля планеты. Не исключено, что вблизи центра Юпитера из тяжелых примесей возникло железокаменное ядро, близкое по размерам к Земле. На границе ядра давление около 40 млн. атм, а температура около 20 000 К. По мнению В. П. Трубицына, Сатурн имеет сходное строение. Одно из возможных отличий Сатурна от Юпитера заключается в том, что зона металлического водорода появляется на глубине 0,5 радиуса планеты (потому что масса Сатурна меньше, чем масса Юпитера).

Надо сказать, что уже после первой стадии обработки данных, полученных при пролете около Юпитера «Пионера-10» и «Пионера-11», сразу же появились несколько иные модели строения Юпитера. Поэтому разработанные модели внутреннего строения планет имеют лишь предварительный характер и, конечно, будут конкретизироваться и уточняться по мере получения новых данных. Но важно, что наука уже нашла путь, встав на который она обязательно получит столь необходимые людям сведения о внутреннем строении планет Солнечной системы.

ПЛАНЕТЫ И ЖИЗНЬ

Наличие планет — необходимое, но недостаточное условие для существования жизни. Трудно представить, что мы когда-нибудь встретим в космосе жизнь, развивающуюся вне планет. Но совершенно ясно, что только немногие планеты стали колыбелью жизни. Достаточно вспомнить, что из 9 больших планет Солнечной системы такой планетой оказалась лишь Земля. По мере накопления научных данных о Венере и Марсе, считавшихся когда-то первыми «кандидатами» в обитаемые небесные тела, разрушились связанные с этим иллюзии. Жизнь, вообще говоря, может существовать в самых различных формах и обладает фантастической способностью приспосабливаться к невероятно «тяжелым» условиям. Однако трудно представить, что она есть на поверхности Венеры, где температура близка к 500° С, давление к 100 атм, а воздух почти целиком состоит из углекислого газа. Очень суровыми оказались и условия на Марсе: разреженная атмосфера, почти лишенная кислорода, ограниченное количество воды и довольно суровый температурный режим. Американские специалисты в 1976—77 гг. осуществили проект «Викинг», в результате чего на поверхность Марса были доставлены две автоматические лаборатории («Викинг-1» и «Викинг-2») с биохимическим оборудованием. Но эксперименты, выполненные с этим оборудованием, не выявили какой-либо биологической активности марсианского грунта.

Из сказанного следует, что и в других планетных системах очень немногие планеты могут оказаться пригодными для жизни и уж, наверное, лишь в некоторых системах оказались условия, благоприятные для появления, развития и существования разумной жизни. Допустив, что такие планеты есть в нашей и других галактиках, ученые пытаются представить себе, каков может быть уровень развития этих неведомых нам внеземных цивилизаций, как можно обнаружить их, каковы пути установления контактов с ними и т. д. Успехи астрономии, радиотехники и космонавтики позволяют уже в XX в. не в плане фантастики, а с позиций материалистической науки и современной техники подойти к проблеме внеземных цивилизаций («проблема ВЦ») — одной из интереснейших проблем естествознания. Но пока мы еще далеки от решения главного вопроса этой проблемы, который можно сформулировать так: «Существуют ли внеземные цивилизации?»

Проблема внеземных цивилизаций на самом деле сложнее, чем может показаться с первого взгляда. Можно спорить и приводить новые доводы в пользу или против внеземных цивилизаций, но лишь дальнейшие наблюдения и эксперименты позволят выяснить, существует ли множество обитаемых миров или мы одиноки во Вселенной.

Известие об открытии внеземного разума мы, может быть, услышим в ближайшем будущем, а может быть, наоборот,— совсем-совсем нескоро.

В последние годы советские и зарубежные ученые неоднократно пытались выделить из потока космического радиоизлучения сигналы, посланные внеземными цивилизациями. Например, в 1960 г. американские ученые в течение двух месяцев проводили систематические наблюдения звезд τ Кита и ε Эридана («Проект Озма» — название дано в честь принцессы сказочной страны Оз из сказки Льюиса Кэрролла «Алиса в стране чудес»). В Советском Союзе поиски сигналов от звезд, расположенных в радиусе 100 св. лет от Солнца, ведутся под руководством члена-корреспондента АН СССР В. С. Троицкого. Но до сих пор ни американским, ни советским ученым не удалось обнаружить сигналы ВЦ.

Предпринимались также попытки «заявить» о существовании нашей цивилизации. С этой целью в космическое пространство направляли радиосигналы, которые, по мнению отправителей, должны будут когда-нибудь привлечь внимание инопланетян. Так, 16 ноября 1974 г. ученые, используя мощный радиопередатчик радиотелескопа, находящегося в Аресибо (Пуэрто-Рико), послали сигналы в направлении звездного скопления М 13 (в созвездии Геркулеса). Предполагается, что некоторые из десятков тысяч звезд этого шарового скопления могут оказаться центрами планетных систем. Космическое послание будет добираться до возможных адресатов почти 24 тыс. лет, и если братья

по разуму оперативно откликнутся, то наши потомки примерно через ...48 тыс. лет получат ответ. Посланная «радиограмма» составлена в двоичной системе счисления. В радиограмме не только перечисляются цифры от 1 до 10, атомные массы некоторых химических элементов (водорода, углерода, азота, кислорода и фосфора), но и сообщаются некоторые сведения о представителях человеческого рода. На борту «Пионера-10» — космического аппарата, которому суждено уйти за пределы Солнечной системы и который, в принципе, может попасть в «руки» инопланетян, также есть табличка, представляющая собой «письмо» к внеземным цивилизациям...

Продолжая поиски и планируя новые, ученые представляют себе сложность проблемы и не исключают возможности того, что разумные существа других миров могут, вообще говоря, оказаться совершенно непохожими на нас и обладать неведомой нам техникой, способом общения и системой понятий... Нужно быть готовым и к этому!



Рис. 1. Башня уникального солнечного телескопа Крымской астрофизической обсерватории Академии наук СССР.



Рис. 2. Советская стратосферная обсерватория в полете.



Рис. 3. Стратосферная обсерватория перед стартом.

Рис. 4. Грануляция.

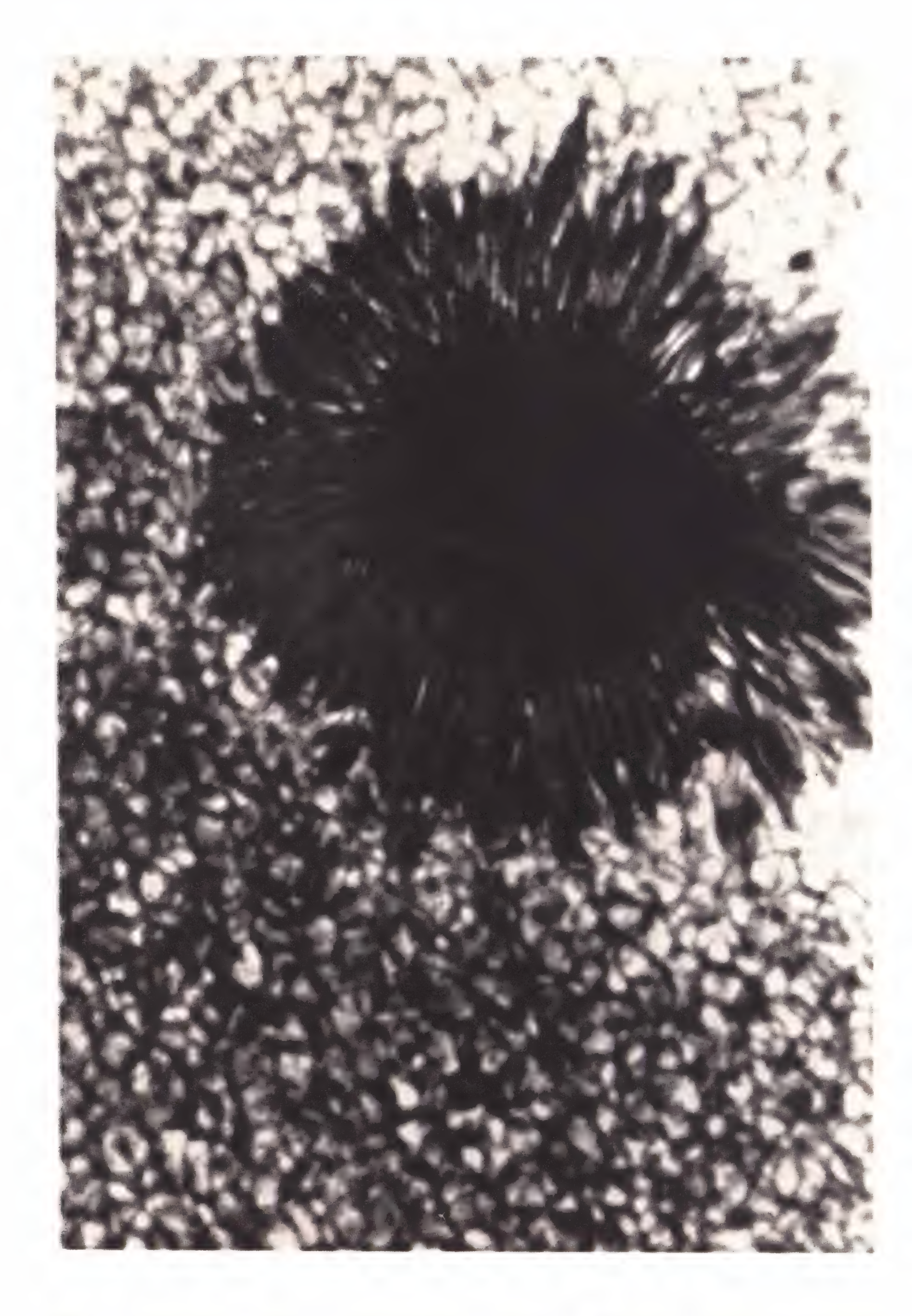


Рис. 5. Солнечное пятно и фотосферные гранулы. (Снимок получен во время одного из запусков советской стратосферной обсерватории.)

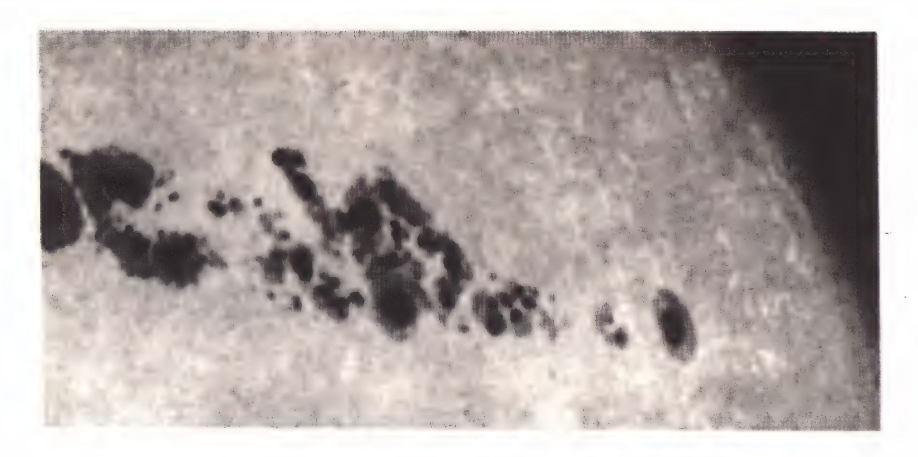


Рис. 6. Большая группа солнечных пятен (20 февраля 1956 г.).

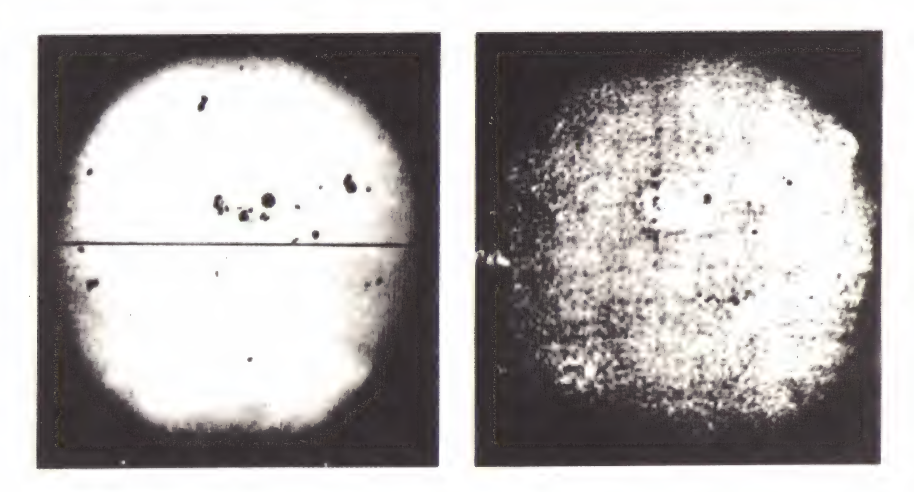


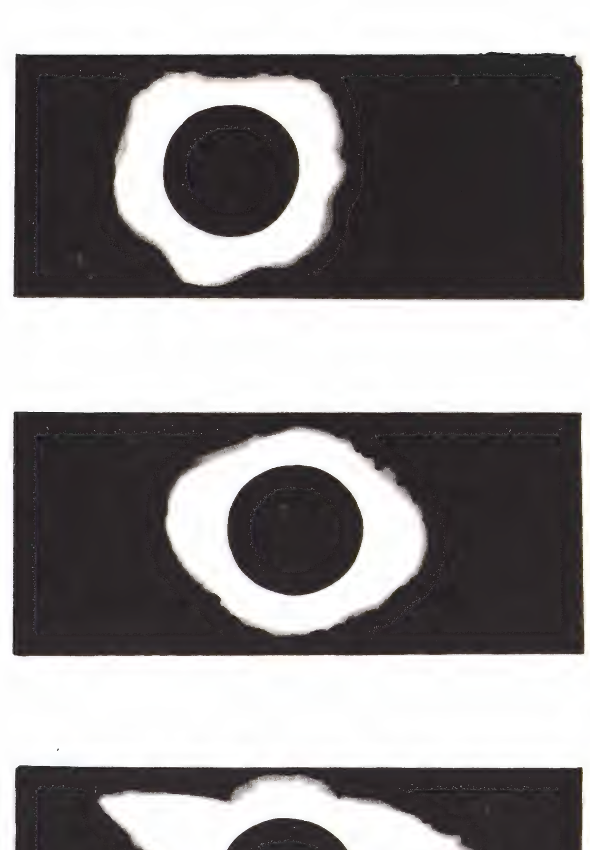
Рис. 7. Фотография Солнца в «белом» свете (левая) и в линии водорода H_{α} (правая).



Рис. 8. Фотография участка Солнца в лучах линии водорода H_α. Хорошо видно солнечное пятно и структура расположенной над ним хромосферы.



Рис. 9. Кинокадры, запечатлевшие в лучах H_{α} мощную протонную вспышку (4 августа 1972 г.).



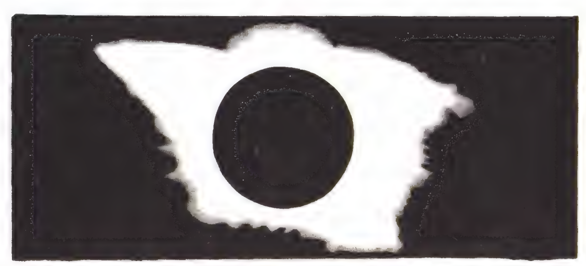


Рис. 10. Вид короны в год максимума солнечной активности (*а*), минимума (*б*) и в период между максимумом и минимумом (*в*).



Рис. 11. Крупнейший в мире внезатменный коронограф. (Инструмент установлен близ Кисловодска на горной станции Главной астрономической обсерватории Академии наук СССР.)



Рис. 12. Солнечная корона. Она сфотографирована 30 июня 1973 г. во время полного затмения, которое советские ученые наблюдали в Мавритании.

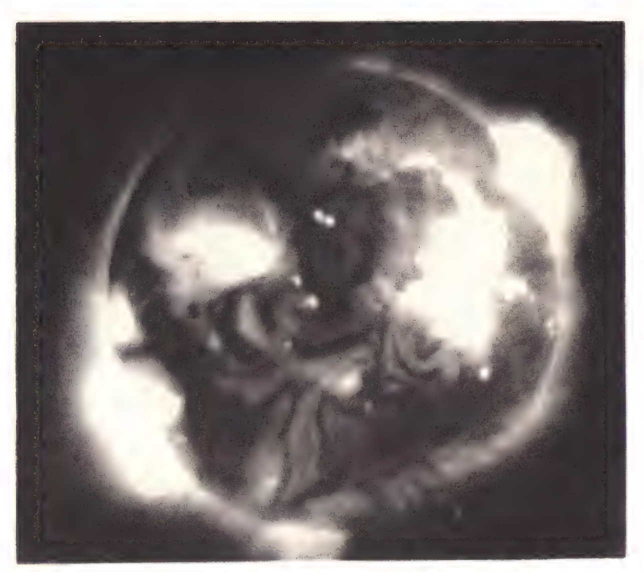


Рис. 13. Снимок Солнца в рентгеновских лучах, показывающий сложную структуру короны (получен на станции «Скайлэб» 28 мая 1973 г.).



Рис. 14. Расшифровка наиболее важных деталей, которые видны на фотографии Солнца в рентгеновских лучах: *1* — корональные дыры; *2* — уярчение на краю; *3* — униполярная область; *4* — активная область; *5* — промежутки между активными областями; *6* — протуберанцы на диске; *7* — яркие точки; *8* — нейтральная линия, ограничивающая комплекс активности.



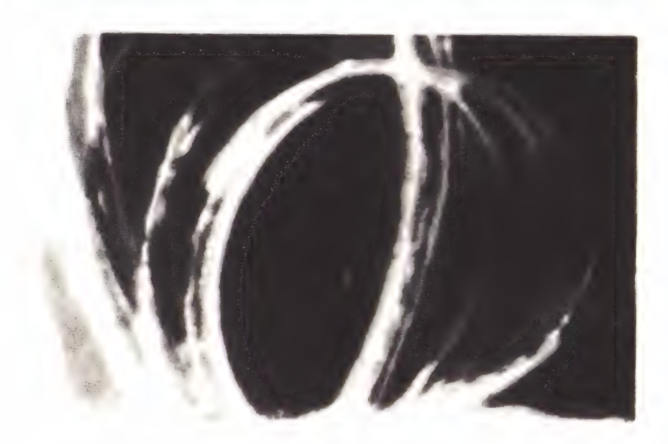




Рис. 15. Протуберанцы.



Рис. 16. Фотография участка звездного неба — созвездие Большой Медведицы.

Рис. 17. Один из вариантов прежних изображений созвездия Большой Медведицы на звездных картах.



Рис. 18. Спиральная галактика NGC 3031 (М 81) в созвездии Большой Медведицы.



Рис. 19. Галактика NGC 2685 напоминает гигантское веретено, на которое нанизаны кольца.

Рис. 20. Взаимодействующие галактики.



Рис. 21. Взрывающаяся галактика М 82 (в созвездии Большой Медведицы).

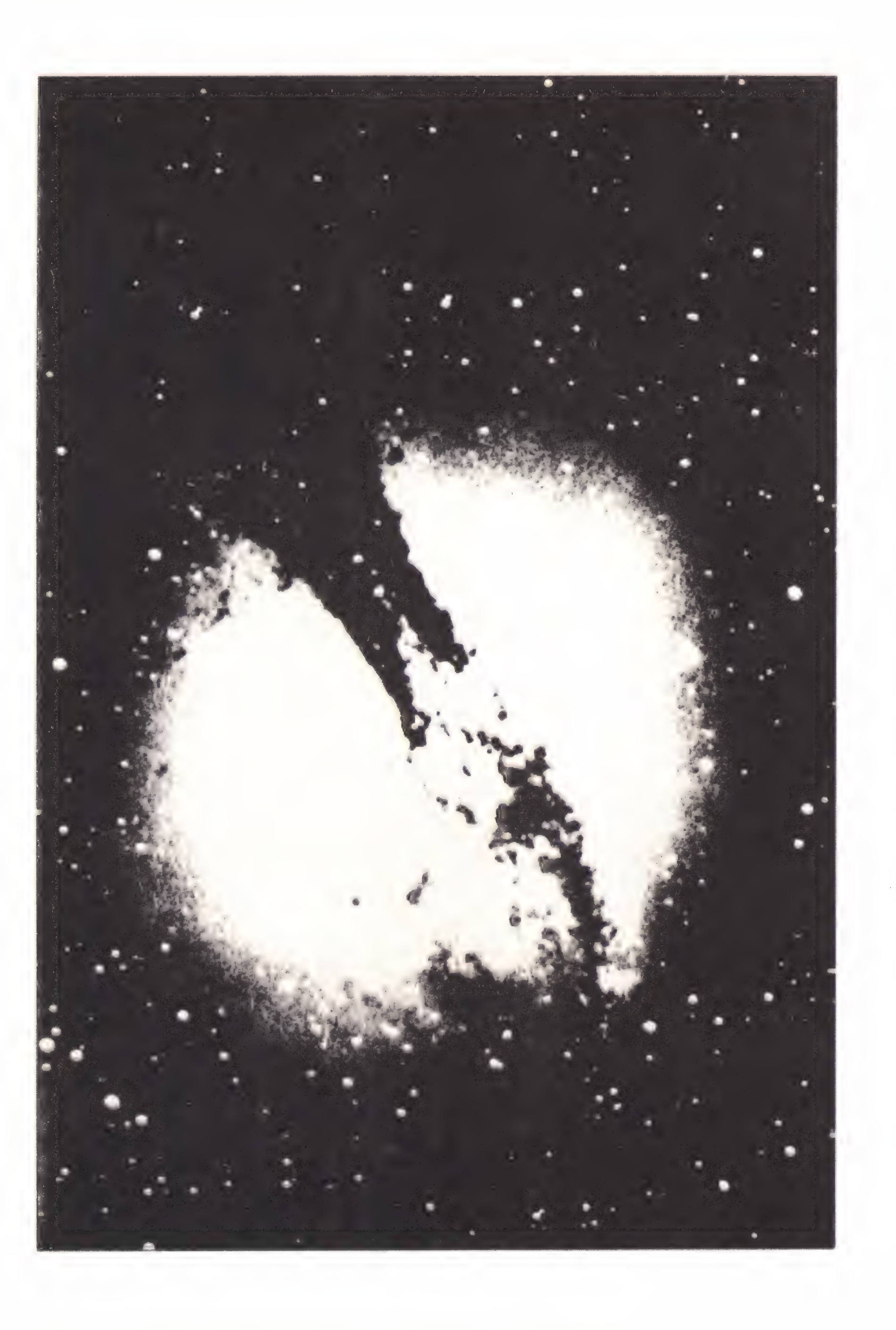


Рис. 22. Радиогалактика Центавр А (она же и на обложке).



Рис. 23. Радиогалактика Лебедь А (указана стрелкой).

Рис. 24. Вид «обычного» квазара (негатив).

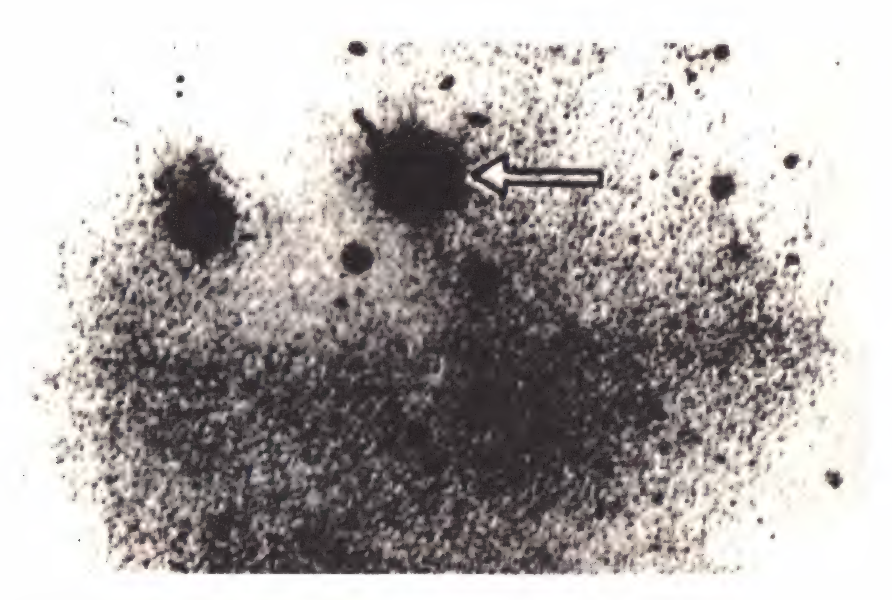


Рис. 25. Квазар 3С 273 (негатив).



Рис. 26. Наша планета — Земля.



Рис. 27. Фотографическая карта Луны.



Рис. 28. Венера. Ряд снимков, сделанных с интервалом в одни сутки («Маринер-10»).

Рис. 29. Сатурн.

Рис. 30. Юпитер («Пионер-10»). Видно Красное Пятно и тень от одного из спутников планеты.

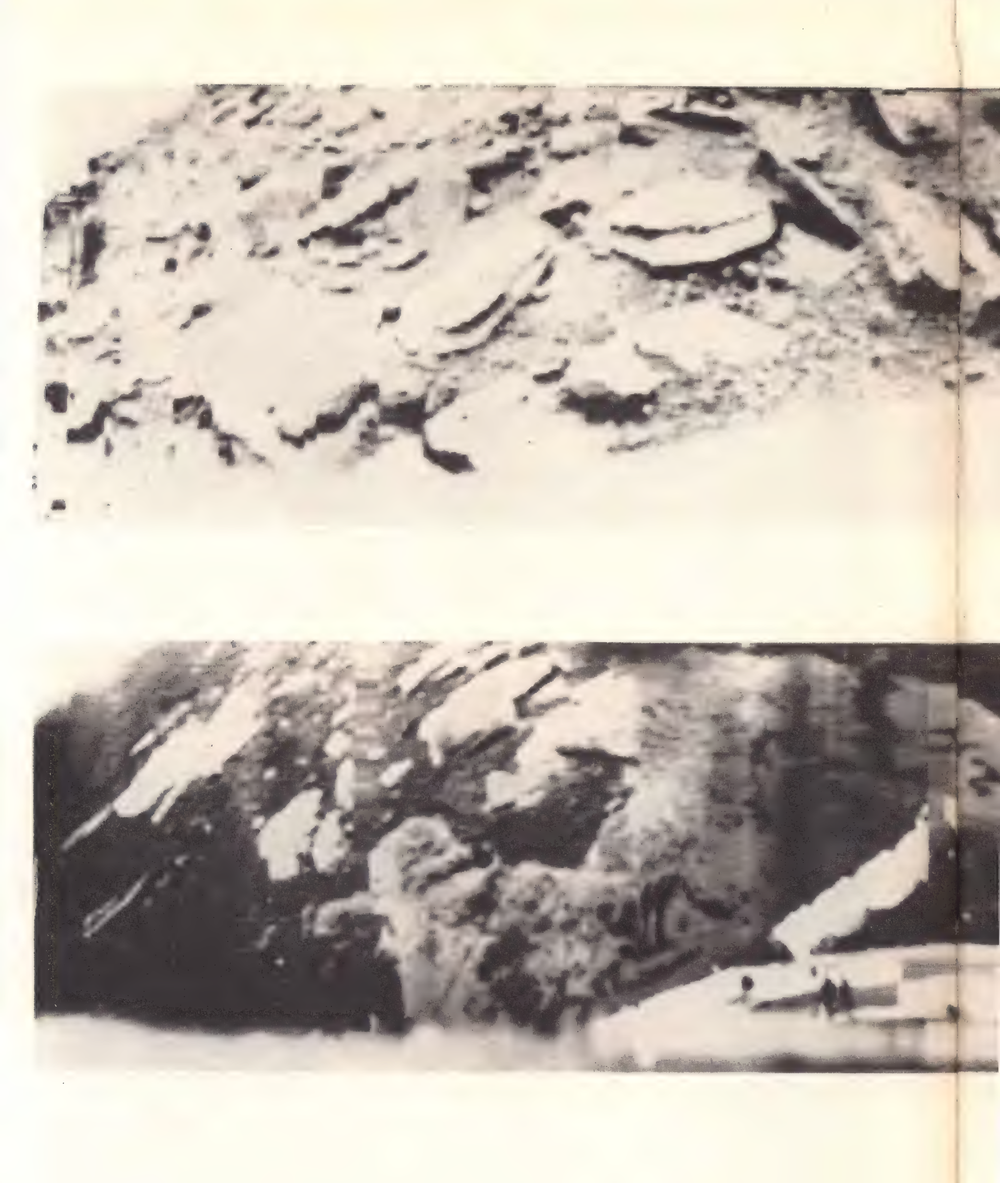


Рис. 31. Панорамы поверхности Венеры, переданные спускаемыми аппаратами станций «Венера-9» (22 октября 1975 г., вверху) и «Венера-10» (25 октября 1975 г., внизу). Сегмент внизу фотографии — часть посадочного устройства (видны пять секций защитного кожуха телефотометра).





Рис. 32. Луна.



Рис. 33. Меркурий («Маринер-10»).

Рис. 34. Марс с расстояния 471 750 км и 452 100 км. Снимок получен с интервалом между экспозициями 47 мин («Маринер-7», август 1969 г.).

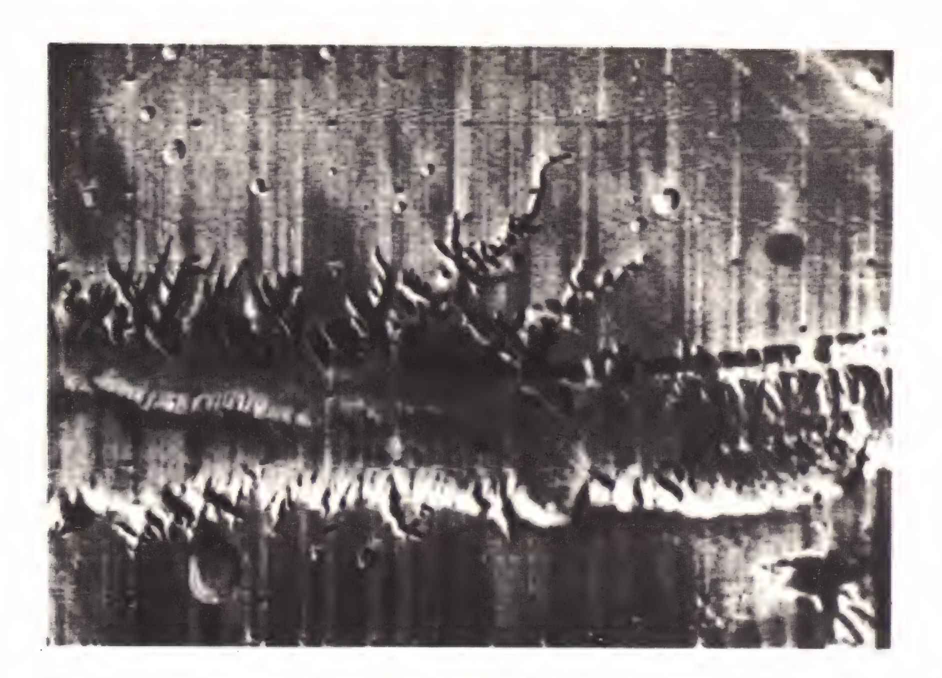


Рис. 36. Часть гигантской рифтовой долины Копрат («Маринер-9»).

◀ Рис. 35. Огромная марсианская гора — Олимпийские Снега («Маринер-9»).

Рис. 37. Участок южной полярной шапки Марса с расстояния в несколько тысяч километров («Маринер-7»). Видны кратеры и «сугробы снега». Справа можно рассмотреть отпечаток гигантской «подошвы» — пока, по словам американских ученых, «единственное доказательство жизни на Марсе»...

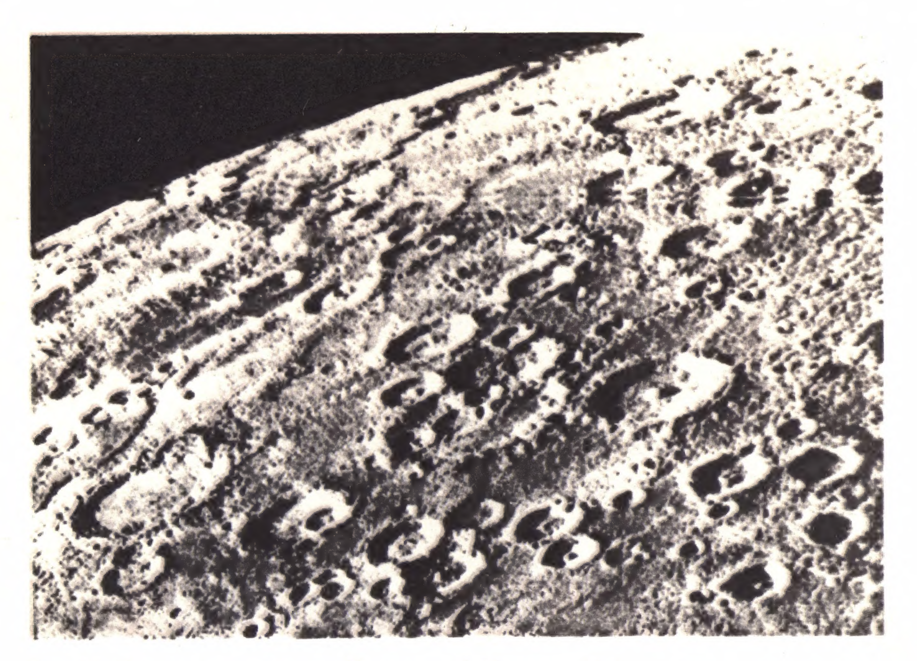


Рис. 39. Участок поверхности Меркурия («Маринер-10»).

◀ Рис. 38. Фотографии участков поверхности Марса («Марс-5»).

Рис. 40. Гигантская башня 6-метрового советского телескопа-рефлектора (Северный Кавказ вблизи станции Зеленчукской).

Рис. 41. Крупнейший в мире советский телескоп-рефлектор с диаметром зеркала 6 м.

Библиография на стр. 4.

ИБ № 964

Левитан Ефрем Павлович

АСТРОФИЗИКА — ШКОЛЬНИКАМ

Редактор **Л С. Мордовцева**
Художник **Ю. В. Львов**
Художественный редактор **В. М. Прокофьев**
Технические редакторы **Н. А. Биркина, С. Н. Филатова**
Корректор **Р. Б. Штутман**

Сдано в набор 25/II 1977 г. Подписано к печати 11/VII 1977 г. 60×90[1]/16. Бумага тип. № 2. Печ. л. 7+2 п. л. вклейка. Уч.-изд. л. 7,40+1,85 вкл. Тираж 80 тыс. экз. А 00084.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение» Государственного комитета Совета Министров РСФСР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.
Типография изд-ва «Уральский рабочий», г. Свердловск, просп. Ленина, 49. Заказ № 171.
Цена 40 коп.

40 коп.